



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

ÚSTAV PROCESNÍHO INŽENÝRSTVÍ

INSTITUTE OF PROCESS ENGINEERING

TLAKOVÉ ZTRÁTY NOSIČŮ KATALYZÁTORŮ

PRESSURE LOSS OF CATALYST CARRIERS

DIPLOMOVÁ PRÁCE

MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Matúš Linda

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. David Jecha, Ph.D.

BRNO 2018

Zadání diplomové práce

Ústav: Ústav procesního inženýrství
Student: **Bc. Matúš Linda**
Studijní program: Strojní inženýrství
Studijní obor: Procesní inženýrství
Vedoucí práce: **Ing. David Jecha, Ph.D.**
Akademický rok: 2017/18

Ředitel ústavu Vám v souladu se zákonem č.111/1998 o vysokých školách a se Studijním a zkušebním řádem VUT v Brně určuje následující téma diplomové práce:

Tlakové ztráty nosičů katalyzátorů

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Pro aplikaci katalyzátorů v průmyslu je používána celá řada nosičů, které mají od základních tvarů např. kuliček až po složité tvary sedel. V neposlední řadě se v dnešní době používají monolitické struktury typu honeycomb. Popřípadě další alternativní řešení nosičů. Tyto katalyzátory se využívají např. v chemickém průmyslu při odstraňování oxidů dusíku ze spalín nebo odplynů v aparátech, kde probíhá selektivní katalytická redukce.

Nosiče katalyzátorů představují různé typy porézní přepážky v technologických aparátech, které vytvářejí tlakovou ztrátu v procesu. Tlakovou ztrátu překonává ve většině případech ventilátor, který zajišťuje proudění media v potrubních trasách. Z energetického hlediska je nutné tyto tlakové ztráty minimalizovat a optimalizovat z hlediska procesu. Z těchto důvodů je nutné umět je dokonale popsat matematickými rovnicemi. Tyto rovnice jsou získávány a ověřovány pomocí experimentálního měření. Hlavním cílem této práce je naměření tlakových ztrát zvolených katalyzátorů a provést validaci rovnic pro hydraulické odpory.

Cíle diplomové práce:

- Seznámení s využitím katalyzátorů především se zaměřením na čištění odpadních plynů a spalin z průmyslu.
- Popis různých typů nosičů katalyzátorů.
- Rešerše literatury o hydraulických odporech.
- Souhrn výpočtových vztahů.
- Experimentální měření hydraulických ztrát na základních typech katalyzátorů, typu honeycomb a pění vukopor.
- Validace naměřených dat s výpočtovými vztahy.
- Porovnání naměřených dat s provedenou rešerší.

Seznam doporučené literatury:

PERRY, R.H.; GREEN, D.W.; MALONEY, J.O. (eds.). Perry's chemical engineers' handbook. 7th ed. New York : McGraw-Hill, 1997. ISBN 0-07-049841-5.

HECK, R. and FARRAUTO, R.: Catalytic air pollution control: Commercial Technology. 2nd edition. New York, 2002. 391 p. ISBN 0-471-43624-0.

HORÁK, J.: Chemická kinetika. 1. vyd. Praha. VŠCHT v Praze, 1968. 356 s.

ZÁKON ze dne 2. května 2012 o ochraně ovzduší. In: 201/2012. 2012.

CRAWFORD, Martin. Air pollution control theory. New York: McGraw-Hill, c1976, xv, 624 p. ISBN 0-471-43624-0.

Termín odevzdání diplomové práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2017/18

V Brně, dne

L. S.

prof. Ing. Petr Stehlík, CSc., dr. h. c.
ředitel ústavu

doc. Ing. Jaroslav Katolický, Ph.D.
děkan fakulty

ABSTRAKT

Diplomová práca je rozdelená na štyri hlavné časti. Prvá časť sa zaoberá problematikou nakladania s odpadmi a jeho energetickým využitím v spaľovni odpadov. Sú spracované škodlivé látky vznikajúce spaľovaním, ako aj emisné limity. Zaoberá sa typmi nosičov katalyzátorov, ich popisom, výrobou a detailnejším spracovaním keramickej peny VUKOPOR. Druhá časť je venovaná technológiám využívajúce katalytické deje a bližšia špecifikácia procesu. V tretej časti je spracovaná rešerš výpočtových metód tlakových strát pre jednotlivé typy nosičov. Štvrtá, najrozsiahlejšia časť popisuje experimentálne zariadenie INTEQII, jeho technológiu a konštrukciu ako aj princíp praktickej časti merania tlakových strát nosičov. Obsahuje vyhodnotenie tlakových strát v samostatných kategóriách nosičov a to sypané lože, HoneyComb a keramická pena VUKOPOR. Následne je vyhotovené vzájomné porovnanie tlakových strát všetkých nosičov vzhľadom na referenčnú veľkosť 1 m. Je diskutovaný vplyv zlepenia vzoriek peny VUKOPOR na veľkosť tlakových strát. V závere tejto časti je vyhodnotená vhodnosť použitia výpočtových metód u jednotlivých nosičov v závislosti na experimentálnych dátach tlakových strát.

KLÚČOVÉ SLOVÁ

Tlakové straty, spaľovanie odpadu, prchavé organické látky, katalytická reakcia, katalyzátor, selektívna katalytická redukcia, katalytická filtrácia, katalytická oxidácia, keramická pena, HoneyComb, sypané lože, Levyho rovnica, Colburn-Chilton, Ergunova rovnica, Hagen-Poiseuille, porézna prepážka, INTEQII.

ABSTRACT

The diploma thesis is divided into four main parts. The first part deals with the issue of waste management and its energy utilization in waste incineration. Processed harmful substances produced by incineration as well as emission limits. It deals with the types of catalytic carriers, their description, production and more detailed processing of ceramic foam VUKOPOR. The second part is devoted to technologies utilizing catalytic processes and a more detailed specification of the process. In the third part there is processed the calculation methods for pressure losses for individual types of carriers. Fourth, the most extensive part describes the INTEQII experimental device, its technology and construction, as well as the principle of the practical part, measuring of the pressure losses of carriers. It includes the evaluation of pressure losses in separate categories of carriers, such as the bed, HoneyComb and VUKOPOR ceramic foam. Subsequently, a comparison of the pressure losses of all carriers is made relative to the reference size of 1 m. The impact of bonding of VUKOPOR foam samples on the size of pressure losses is discussed. At the end of this section, the suitability of calculation methods for individual carriers is evaluated, depending on the experimental pressure loss data.

KEYWORDS

Pressure loss, waste incineration, volatile organic compounds, catalyst reaction, catalyst, selective catalytic reduction, catalytic filtration, catalytic oxidation, ceramic foam, HoneyComb, bulk bed, Levy equation, Colgurn-Chilton, Ergun equation, Hagen-Poiseuille, INTEQII.

BIBLIOGRAFICKÁ CITÁCIA

LINDA, M. *Tlakové ztráty nosičů katalyzátorů*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2018. 98 s. Vedoucí diplomové práce Ing. David Jecha, Ph.D.

ČESTNÉ PREHLÁSENIE

Prehlasujem, že táto práca je mojím pôvodným dielom, spracoval som ju samostatne pod vedením Ing. David Jecha, Ph.D. a s použitím literatúry uvedenej v zozname.

V Brne dňa 23. května 2018

.....

Meno a priezvisko

POĎAKOVANIE

Týmto ďakujem Ing. Davidovi Jechovi, Ph.D za cenné rady, pripomienky a skúsenosti získané pri vypracovaní diplomovej práce. Ďakujem aj svojej rodine, za poskytnutie podpory v priebehu štúdia.

OBSAH

Úvod	15
1 Spal'ovňa odpadov	16
1.1 Princíp spal'ovne Waste to Energy.....	16
1.2 Škodlivé látky vznikajúce pri spaľovaní odpadu	18
1.3 Emisné limity platné pre spaľovňu odpadov	20
1.4 Odstraňovanie emisií VOC z odpadných odplynov	21
1.4.1 Vplyv VOC na životné prostredie a emisné limity.....	21
1.4.2 Technológie znižovania emisií VOC.....	23
2 Katalyzátory.....	27
2.1 Monolitické katalyzátory	28
2.1.1 Výroba nosičov HoneyComb	30
2.2 Sypané lože	31
2.2.1 Výroba nosičov sypaných loží.....	31
2.3 Vukopor	32
2.3.1 Výroba filtrov Vukopor	33
2.3.2 Typy penových filtrov	34
2.3.3 Meranie Pórovitosti keramických filtrov.....	36
3 Technológie využívajúce katalytické deje.....	40
3.1 Selektívna katalytická redukcia SCR.....	40
3.2 Katalytická filtrácia.....	42
3.3 Katalytická oxidácia VOC	43
4 Tlakové straty	45
4.1 Výpočet tlakovej straty sypaného lože	46
4.1.1 Vzorový výpočet podľa Levyho	49
4.1.2 Vzorový výpočet podľa Colburn-Chilton.....	50
4.1.3 Vzorový výpočet podľa Ergunovej rovnice	51
4.2 Výpočet tlakovej straty monolitického nosiča.....	52
4.2.1 Vzorový výpočet podľa Hagen-Poiseuille.....	54
4.3 Výpočet tlakovej straty poréznej peny Vukopor	56
4.3.1 Tlaková strata poréznej prepážky	56
4.3.2 Tlaková strata podľa Erguna	57
4.3.3 Vzorový výpočet pomocou poréznej prepážky	57
4.3.4 Vzorový výpočet pomocou Ergunovej rovnice	58
4.4 Ventilátory	59
5 Experimentálne zariadenie INTEQ II.....	62

5.1	Popis technológie INTEQ II.....	63
5.2	Vybavenie zariadenia INTEQ II.....	66
5.3	Základná výpočtová charakteristika GHSV	67
6	Praktická časť	68
6.1	Meranie tlakovej straty sypaného lože	70
6.2	Meranie tlakovej straty nosičov HoneyComb	73
6.3	Meranie tlakovej straty keramickej peny VUKOPOR	76
7	Vyhodnotenie výsledkov.....	80
7.1	Vyhodnotenie keramických filtrov VUKOPOR	83
7.2	Výpočet tlakových strát sypaných loží.....	84
7.3	Výpočet tlakových strát nosičov HoneyComb	86
7.4	Výpočet tlakových strát keramickej peny VUKOPOR.....	88
	Záver	91
	Zoznam použitej literatúry podľa ČSN ISO 690	93
	Zoznam použitých skratiek a symbolov.....	96
	Zoznam príloh	99

ÚVOD

Veľkosť tlakových strát v akejkoľvek výrobnej alebo spracovateľskej linke priemyselného odvetvia je veľmi dôležitý parameter. Ovplyvňuje ekonomickú náročnosť prevádzky ako aj účinnosť celého procesu. Najväčšiu tlakovú stratu vytvára časť linky na čistenie spalín prípadne iných plynov. Obsahuje nosiče katalyzátorov, ktoré slúžia napríklad v chemickom priemysle na odstraňovanie oxidov dusíka zo spalín alebo odplynov v aparátoch, kde prebieha selektívna katalytická redukcia. Najznámejší zdroj spalín, ktoré podliehajú procesu čistenia v katalyzátoroch je napríklad spaľovanie komunálneho, prípadne iného aj nebezpečného odpadu v spaľovni odpadov.

Existuje množstvo typov keramických nosičov katalyzátorov, od najznámejších monolitických voštinových štruktúr typu HoneyComb, po rôzne sypané lože ako Pall, Lessing alebo Raschigovy krúžky, rôzne sedlá ako Berlovo alebo Intalox, telieska Interpack alebo guľičky. Všetky tieto nosiče katalyzátorov vytvárajú významnú tlakovú stratu v procese. Tlakovú stratu vo väčšine prípadov prekonáva ventilátor, ktorý zaisťuje prúdenie média v potrubných trasách. Z energetického, a teda ekonomického hľadiska je potrebné tlakové straty minimalizovať a optimalizovať. Pre tento účel je taktiež potrebné dokonale popísať tlakových strát matematickými rovnicami pre potreby minimalizácie, optimalizácie ale aj prvotného návrhu celého procesu. Existuje viacero matematických rovníc a spôsobov výpočtu tlakových strát pre rôzne typy nosičov katalyzátorov, ktoré je potrebné overiť pomocou dát získaných experimentálnym meraním.

So sprísňujúcou sa legislatívou na kvalitu ovzdušia a účinnosti čistenia vypúšťaných plynov do atmosféry je potrebné proces čistenia neustále vylepšovať. Naskytuje sa tak využitie keramickej peny VUKOPOR, ktorá sa využíva v zlievarenskom priemysle na filtráciu zliatiny. Jej štruktúra pripomínajúca poréznu penu je z hľadiska katalytickej reakcie výhodná, keďže vyniká vysokými hodnotami medzerovitosti ako aj vnútorným povrchom. Jedná sa tak o teoreticky výhodný nosič katalyzátora, ktorý je ale nutné skúmať z pohľadu tlakových strát a ich matematickým vyjadrením. Vyrába sa s rôznymi veľkosťami buniek a medzerovitosti a tak je možné vybrať vhodnú penu v závislosti od povahy procesu.

1 SPALOVŇA ODPADOV

Tvorba odpadu je neoddeliteľnou súčasťou každodenného života ľudí. Spracovanie odpadu je čoraz častejšou témou z dôvodu narastajúcich požiadaviek na čistotu životného prostredia. Odpad sa v dnešnej dobe ukladá na skládky, kde môže dochádzať ku kontaminácii pôdy a znečisteniu vody a vzduchu. Ďalšou možnosťou je recyklovanie, kompostovanie a snaha znížiť množstvo vyprodukovaného odpadu. Keďže veľká časť odpadu nie je recyklovateľná, ostatný komunálny odpad sa využíva energeticky v tzv. Waste to Energy spaľovniach odpadu.



Obrázok 1.1: Kolobeh odpadu [1]

1.1 PRINCÍP SPALOVNE WASTE TO ENERGY

Waste to Energy spaľovne získavajú energiu z odpadu, ktorý nemôže byť recyklovaný. Moderné zariadenia majú negatívny efekt na životné prostredie a sú celosvetovo využívané k zisku „zelenej“ energie napríklad pre zásobovanie domácností elektrinou. Waste to Energy je v dnešnej dobe veľký trend, ktorý sa veľmi rýchlo rozvíja a je mu venovaná veľká pozornosť. Napríklad európske štáty ako Rakúsko, Holandsko, Nemecko alebo Belgicko spracovávajú približne 60 % produkovaného odpadu, z čoho 65 % spracovávajú recykláciou a 35 % spaľovaním v týchto elektrárnach [2].

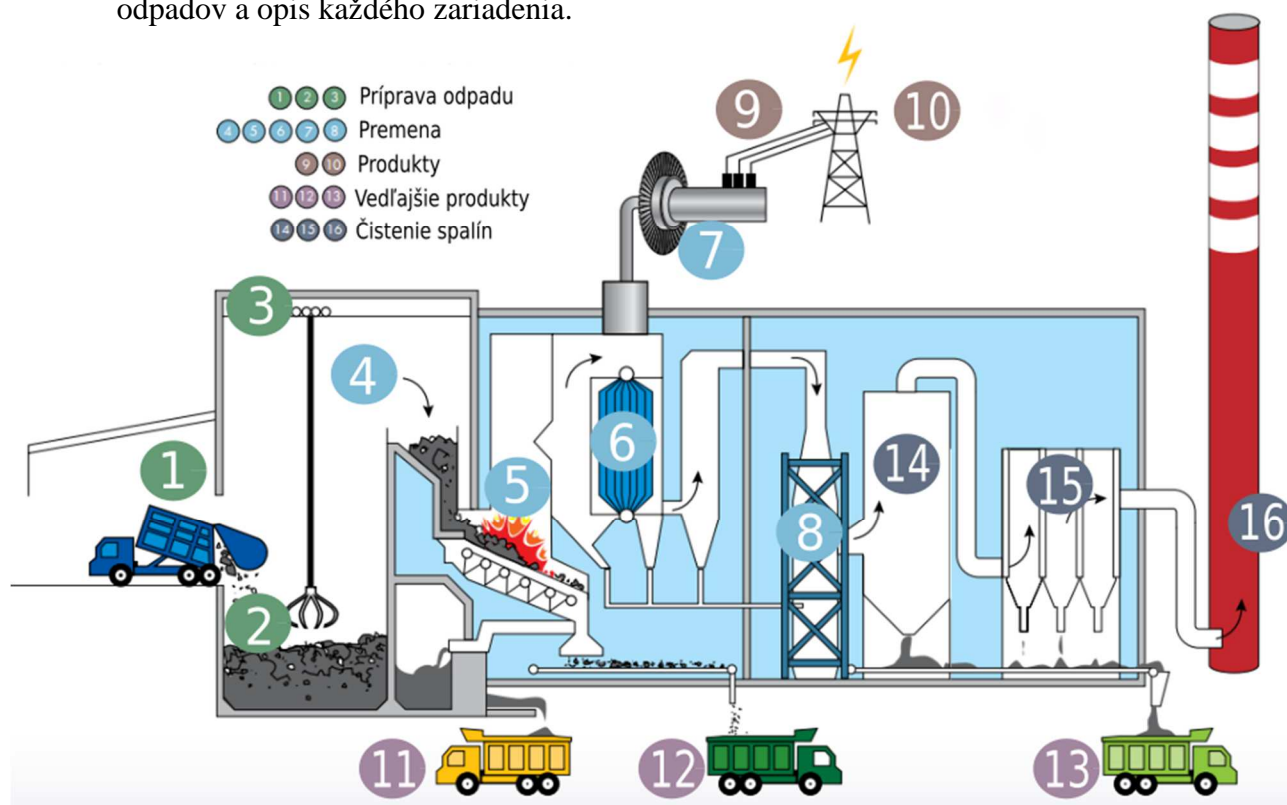
Odpad, ktorý zostane po recyklácii, sa prepraví do Waste to Energy spaľovne, kde sa z neho získava elektrina, horúca voda alebo para. Horúca voda môže byť využitá k vykurovaniu, alebo iným účelom, v závislosti na miestnej infraštruktúre. Premena odpadu na vyššie zmienené produkty sa deje pomocou rôznych metód ako [2]:

- 1) Spaľovanie – najbežnejšia a najvyužívanejšia metóda spracovania nerecyklovateľného odpadu. Odpad je spaľovaný v peci bez zložitého pred-spracovania. Spaľovanie sa deje pri extrémne vysokých teplotách nad 1000 °C, čo má za následok vznik energie vo forme tepla, ktorá je použitá na výrobu pary. Využitie vzniknutej pary závisí na lokalite spaľovne a jej možnostiach. Ako vedľajší produkt vzniká popolček, usadený popol a z neho získané kovy. Vďaka systému čistenia

spalín, ktoré zachytávajú škodlivé prvky v spaliniách vypúšťajú tieto spaľovne len veľmi malé množstvo emisií do ovzdušia [2].

- 2) Splyňovanie a pyrolýza – touto metódou sa získava z odpadu syntetický plyn, para alebo ich kombinácia. Produkt môže byť ihneď spálený k získaniu tepla alebo využitý v plynových turbínach pre generovanie elektriny. Syntetický plyn je možné tiež premeniť na inú chemikáliu, napr. metanol alebo etanol. Nevýhoda tejto metódy je nutnosť odpad najprv spracovať [2].

Na obr. 1.2 sa nachádza schéma spaľovne pre porozumenie celého procesu spaľovania odpadov a opis každého zariadenia.



Obrázok 1.2 Schéma Waste to Energy spaľovne odpadov [3]

Celé zariadenie je non-stop riadené z kontrolnej miestnosti kvalifikovaným personálom, ktorý dohliada na bezproblémovú a bezpečnú prevádzku. V prvom kroku (1) prebieha dovoz komunálneho odpadu do skladovacieho priestoru. Manipulačná ruka (2), ktorá je manuálne ovládaná operátorom (3), presúva a nakladá odpad do napájacích žľabov (4), ktoré dávkujú odpad do spalovacej komory (5). V spalovacej komore prebieha spaľovanie pri teplote viac ako 1000 °C. Horúci plyn zo spalovacieho procesu pokračuje do varáku (6), v ktorom dochádza k prenosu tepla medzi plynom a vodou v trubkách a tak vzniká horúca para. Plyn pokračuje do sekcie čistenia spalín a horúca para poháňa elektrický generátor (7) a vytvára elektrickú energiu. V mnohých elektrárňach je časť horúcej pary (8) využívaná vo vykurovacej sieti domácností, nemocníc atď. Vyrobená elektrická energia je predaná distribútorovi, ktorý ju dodáva do domácností (9, 10). Usadený popol (11) na dne spalovacej pece sa pretriedi od kovového šrotu a použije sa ako prídavný materiál pri výrobe asfaltu,

ciest a ako pokrývka skládok odpadov. Vytriedený kov (12) je spracovaný a predaný do kovospracujúceho priemyslu. Popolček (13), ktorý vzniká pri spaľovaní a je unášaný spalinami zachytávajú filtre a je odvázaný na skládku. Spaliny ďalej prechádzajú systémom čistenia spalín (14, 15) za účelom zbavenia škodlivých látok a iných nechcených emisií. Tento proces je po celý čas prísne monitorovaný. Spaliny o vyhovujúcej čistote odchádzajú zo spaľovne komínom (16) [3]

1.2 ŠKODLIVÉ LÁTKY VZNIKAJÚCE PRI SPAĽOVANÍ ODPADU

Pri spaľovaní odpadu vznikajú mnohé škodlivé látky, ktoré je potrebné eliminovať. Ak sa koncentrácia týchto látok meria priamo u zdroja znečisťovania, ako je napr. komín, jedná sa o emisie. Ak meranie prebieha mimo zdroja znečisťovania, kedy dôjde k rozptýleniu emisií do ovzdušia a meracie stanice nasávajú vzduch a merajú znečistenie, jedná sa o imisie [12]. Pri spaľovaní odpadu vznikajú tieto škodliviny:

- Tuhé znečisťujúce látky (TZL): jedná sa o zložitú zmes organických a anorganických látok. TZL sa delia podľa veľkosti na hrubšie častice s priemerom od 2,5-10 μm a jemnejšie častice s priemerom menším než 2,5 μm . Najnebezpečnejšie TZL sú častice menšie ako 10 μm , ktoré môžu preniknúť do pľúc a spôsobiť tak vážne zdravotné problémy [13].
- Oxid uhoľnatý (CO): vzniká spaľovaním odpadu pri nedostatočnom prístupe kyslíka do spaľovacieho procesu. Je bezfarebný, bez zápachu a jedovatý, keďže sa viaže na hemoglobín, ktorý prepravuje kyslík v červených krvinkách, a tým vytláča kyslík z hemoglobínu [13].
- Oxidy dusíka (NO_x): oxid dusnatý NO vzniká pri vysokoteplotnom spaľovaní odpadu, pričom ďalej reaguje s kyslíkom a vzniká oxid dusičitý NO_2 . Emisie sa merajú ako NO_x , čo znamená súčet koncentrácií NO a NO_2 . V analyzátore najprv NO_2 konvertuje na NO, zmeria sa a výsledná koncentrácia sa prepočíta na objemovú koncentráciu NO_2 . NO_2 je vo vysokých koncentráciách silno toxický a spôsobuje vážne poškodenie pľúc. Taktiež sa jedná o silno oxidujúcu látku reagujúcu s vodnou parou vo vzduchu a vytvára tak kyselinu dusičnú [13].
- Oxid siričitý (SO_2): má výrazný zápach, je nehorľavý a bezfarebný. Dráždi dýchacie cesty a oči a vo veľkých koncentráciách môže spôsobiť smrť. Spolu s vysokými koncentraciami TZL majú ešte škodlivejší efekt [13].
- Organické látky (TOC): obsahujú vo svojej štruktúre uhlík a jedná sa o individuálne zlúčeniny ako uhl'ovodíky, halogén karbóny a oxygény. Sú bez zápachu, bez chuti, bezfarebné a sú zdraviu škodlivé a rakovinotvorné [13].
- Ťažké kovy: jedná sa o látky ako Sb, As, Pb, Cr, Co, Cu, Mn, Ni, V a ich zlúčeniny. Sú stabilné a perzistentné (pretrvávajúce) znečisťujúce látky, ktoré sa akumulujú vo vode a pôde a nemožno ich rozložiť ani eliminovať. Majú škodlivé účinky na životné prostredie a ľudské zdravie [13].
- Polychlórované dibenzo-p-dioxíny PCDD a polychlórované dibenzo-fúrany PCDF: vznikajú pri nedokonalom spaľovaní a obsahujú veľké množstvo látok. Jedná sa tiež o perzistentné látky, ktoré sú vysoko toxické už pri veľmi malých množstvách. Sú

karcinogénne, oslabujú imunitu, spôsobujú poruchy nervového systému a poruchy vývoja detí [13].

HCl a HF: plynné zlúčeniny chlóru HCl a plynné zlúčeniny fluoru HF [13]

1.3 EMISNÉ LIMITY PLATNÉ PRE SPALOVŇU ODPADOV

Pre spaľovňu odpadov platia špecifické emisné limity (tab 1.1) podľa Príloha č. 4 k vyhláške č. 415/2012 Sb. [4], ktoré sú vzťahované k celkovej menovitej kapacite, na normálne stavové podmienky a na suchý plyn pri referenčnom obsahu kyslíku v odpadnom plyne 11 %. Tieto limity sú zisťované primárne kontinuálnym meraním. Vyhláška je platná od 30. 11. 2012 v aktuálnom znení od 01. 01. 2018.

Tabuľka 1.1: Špecifické emisné limity pre spaľovňu odpadov – kontinuálne meranie [4]

Znečisťujúca látka	Emisný limit ¹⁾ [mg.m ⁻³]			
	Denný priemer	Polhodinové priemery		10 minútový priemer
		97%	100%	95%
TZL	10	10	30	-
NO _x	400 ²⁾ 200	200	400	-
SO ₂	50	50	200	-
TOC	10	10	20	-
HCl	10	10	60	-
HF	1	2	4	-
CO	50	-	100 ³⁾	150 ³⁾

Vyhláška ďalej definuje emisné limity zisťované primárne jednorazovým meraním (tab. 1.2).

Tabuľka 1.2: Špecifické emisné limity pre spaľovňu odpadov – jednorázové meranie [4]

Znečisťujúce látky	Emisné limity
Cd+Tl a jeho zlúčeniny	0,05 mg.m ⁻³
Hg a jej zlúčeniny	0,05 mg.m ⁻³
Sb+As+Pb+Cr+Co+Cu+Mn+Ni+V a ich zlúčeniny	0,5 mg.m ⁻³
PCDD/F	0,1 ng TEQ.m ⁻³

1.4 ODSTRAŇOVANIE EMISIÍ VOC Z ODPADNÝCH ODPLYNOV

Ďalším odvetvím, kde sa využívajú katalytické reakcie je čistenie VOC z odpadných odplynov. VOC je skratka pre prchavé organické látky (Volatile Organic Compounds). V zákone 201/2012 je VOC definované ako „*jakákoli organická sloučenina alebo směs organických sloučenin, s výjimkou methanu, která při teplotě 20 °C má tlak par 0,01 kPa nebo více nebo má odpovídající těkavost za konkrétních podmínek jejího použití*“ [5].
Vyhláška 415/2012 delí prchavé organické látky na:

„a) těkavé organické látky, které jsou klasifikovány jako látky karcinogenní, mutagenní a toxické pro reprodukci a jimž jsou přiřazeny standardní věty o nebezpečnosti H340, H350, H350i, H360D nebo H360F, nebo které musí být těmito větami označovány,

b) halogenované těkavé organické látky, jimž jsou přiřazeny standardní věty o nebezpečnosti H341 nebo H351, nebo které musí být těmito větami označovány,

c) těkavé organické látky, které nespadají pod písmeno a) nebo b)“ [4].

Emisie VOC sú označované ako fugitívne emisie, čo znamená vypúšťanie akýchkoľvek prchavých organických látok voľne do atmosféry iným spôsobom ako komínom alebo výdychom [4]. Fugitívne emisie nie je možné všeobecne merať z dôvodu neuspokojivého stanovenia množstva vzduchu unášajúceho takéto znečistenie ani jeho koncentráciu. Úniky znečistenia VOC môžu byť bodové, plošné, líniové, fugitívne, rozptýlené a teda miesta, ktorými dochádza k výmene vzduchu. Jediný bodový zdroj znečistenia sa považuje za merateľný s dostatočnou presnosťou. Fugitívne emisie môžu byť vynesené z pracovného prostredia inými médiami ako vzduchom a to odpadnou vodou znečistenou rozpúšťadlami [6].

1.4.1 VPLYV VOC NA ŽIVOTNÉ PROSTREDIE A EMISNÉ LIMITY

VOC sú schopné reagovať s ďalšími škodlivými látkami ako napr. oxidy dusíku a vytvárať tak iné škodlivé zlúčeniny. VOC podporujú vznik prízemného ozónu, ktorý má za následok ničenie úrody, lesov, vegetácie a v neposlednom rade poškodzuje ľudské zdravie, a to najviac v mestských oblastiach. Taktiež niektoré zložky VOC podporujú vznik skleníkového efektu ohrozovaním vrstvy stratosférického ozónu.

Dôležitým faktom je doba expozície, ktorá ovplyvňuje okamžitý účinok na organizmy. Vystavenie sa koncentrácií 40 mg/m³ môže byť smrteľné už po 5 – 10 minútach. VOC majú narkotické účinky, čo spôsobuje kŕče, dráždivý účinok na sliznice očí, dýchacích ciest a tráviaceho traktu [6].

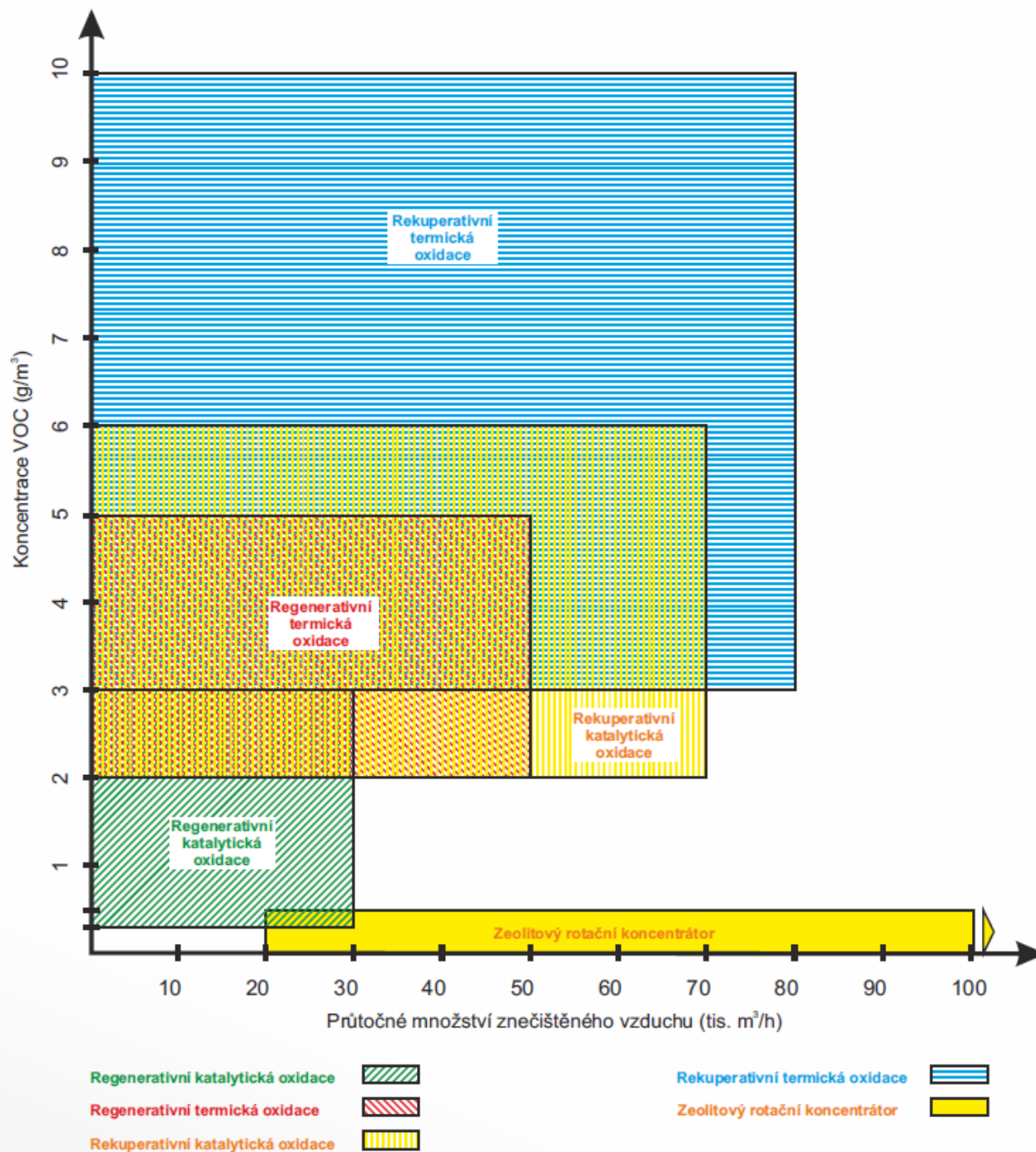
Každý výrobok má svoje škodliviny ako toxické, karcinogénne a teratogénne látky, ktoré sú veľmi nebezpečné pre ľudský organizmus. Preto je dôležité všetky nebezpečné suroviny obsahujúce VOC kontrolovať podľa bezpečnostných alebo katalógových listov, kde sú všetky koncentrácie uvedené [6].

Problematica VOC a ich emisií je veľmi komplikovaná z dôvodu širokého spektra priemyselných odvetví a rozsahu činností, ktoré využívajú VOC. Znečisťujúce látky VOC sa v emisiách do ovzdušia merajú ako TOC (celkový organický uhlík) a nezáleží pritom z akých rozpúšťadiel emisie pochádzajú. Emisné limity rozlišujú VOC_F čo je podiel hmotnosti fugitívnych emisií prchavých organických látok a hmotnosť vstupných organických rozpúšťadiel. VOC_E je podiel hmotnosti emisií prchavých organických látok a množstva produkcie alebo množstva vstupných organických rozpúšťadiel alebo celkového množstva spotrebovaných vstupných surovín s obsahom VOC [4]. Vyhláška č. 415/2012 v časti II definuje emisné limity pre 24 špecifických odvetví ako: lakovne, farmaceutické, gumárenské, tlačiarenské, strojárské, hutné a petrochemické odvetvia [6].

Limity VOC_F a VOC_E sa uvádzajú buď ako percentuálny obsah TOC alebo priamo ako limit v mg/m^3 , g/m^2 , g/kg [4]. Pre všetky spomenuté odvetvia, ktoré znečisťujú ovzdušie VOC sa používajú rovnaké metódy a technológie záchytu a odstránenia VOC zo vzdušiny [4].

1.4.2 TECHNOLOGIE ZNIŽOVANIA EMISIÍ VOC

Technológie znižovania emisií VOC sa delia podľa koncentrácie VOC v mg/m^3 a je znázornená na obr. 1.3. Typické zdroje emisií VOC sú chemický, farmaceutický priemysel, povrchové úpravy materiálu a výrobkov a tlačiarne.



Obrázok 1.3 Oblasti použitia technológií čistenia emisií VOC [7]

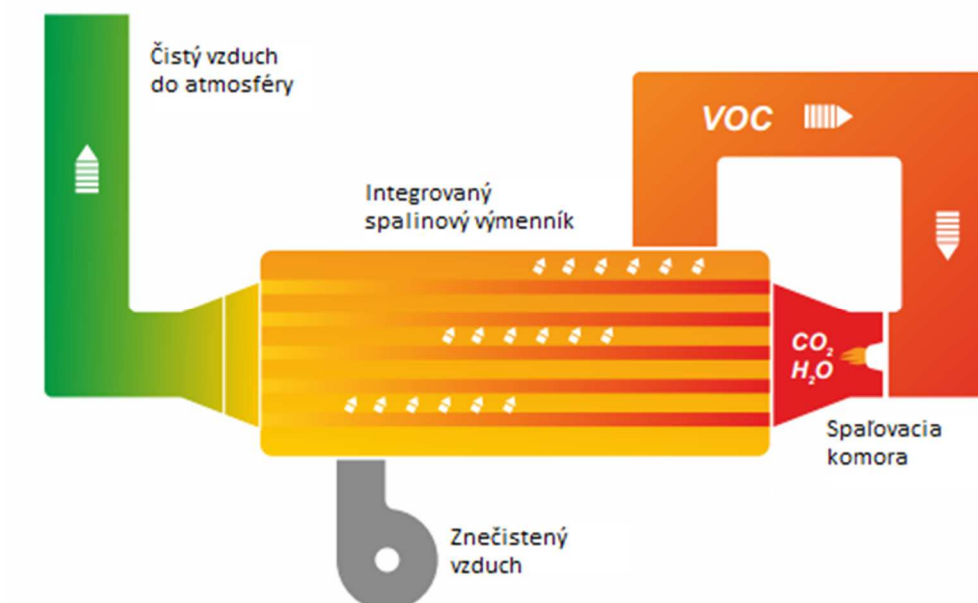
Používané technológie odstraňovania emisií VOC z odpadných plynov sú:

- Rekuperatívna termická oxidácia
- Regeneratívna termická oxidácia
- Regeneratívna katalytická oxidácia
- Rekuperatívna katalytická oxidácia
- Zeolitový rotačný koncentrátor

Obe regeneratívna a rekuperatívna katalytická oxidácia budú opísané v kapitole 3.3.

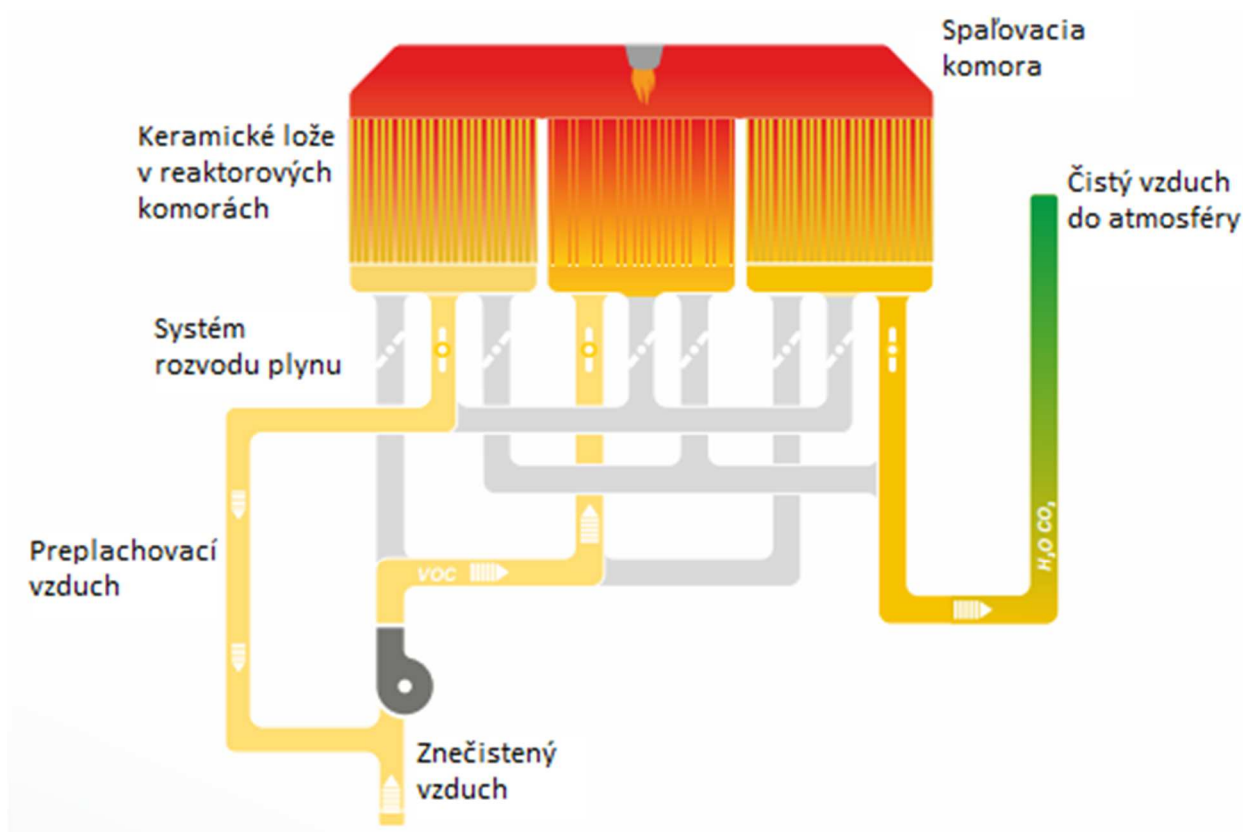
Pomocou **rekuperatívnej termickej oxidácie** sa čistí znečistený vzduch VOC jeho priamym spálením v ocelevej spaľovacej komore vybavenou plynovým horákom, integrovaným spalínovým výmenníkom tepla s kruhovým usporiadaním trubiek a ventilátor, ktorý transportuje vyčistený vzduch do atmosféry. Znečistený vzduch sa najskôr predhreje vo výmenníku tepla a ďalej pokračuje do horáka, kde dochádza k spáleniu VOC pri teplote 700 – 800 °C. Vzduch sa v komore pri tejto teplote zdrží minimálne 1 sekundu, pričom dochádza k spáleniu VOC zložiek pri účinnosti 99,9 % a následnému vytvoreniu CO₂ a H₂O a uvoľneniu reakčného tepla, ktoré sa ďalej predáva znečistenému vzduchu vo výmenníku tepla.

Táto technológia sa používa pre plyn so stredným a vyšším obsahom VOC cca 3 – 10 g/m³ a dokáže spaľovať vzduch v jednotkách až desiatkach tisíc m³/h. Medzi hlavné výhody tejto technológie patrí spoľahlivosť, robustnosť a flexibilita zariadenia z hľadiska koncentrácie VOC, efektívne využitie odpadného tepla a teda nízke provozné náklady. Na obr. 1.4 [8].



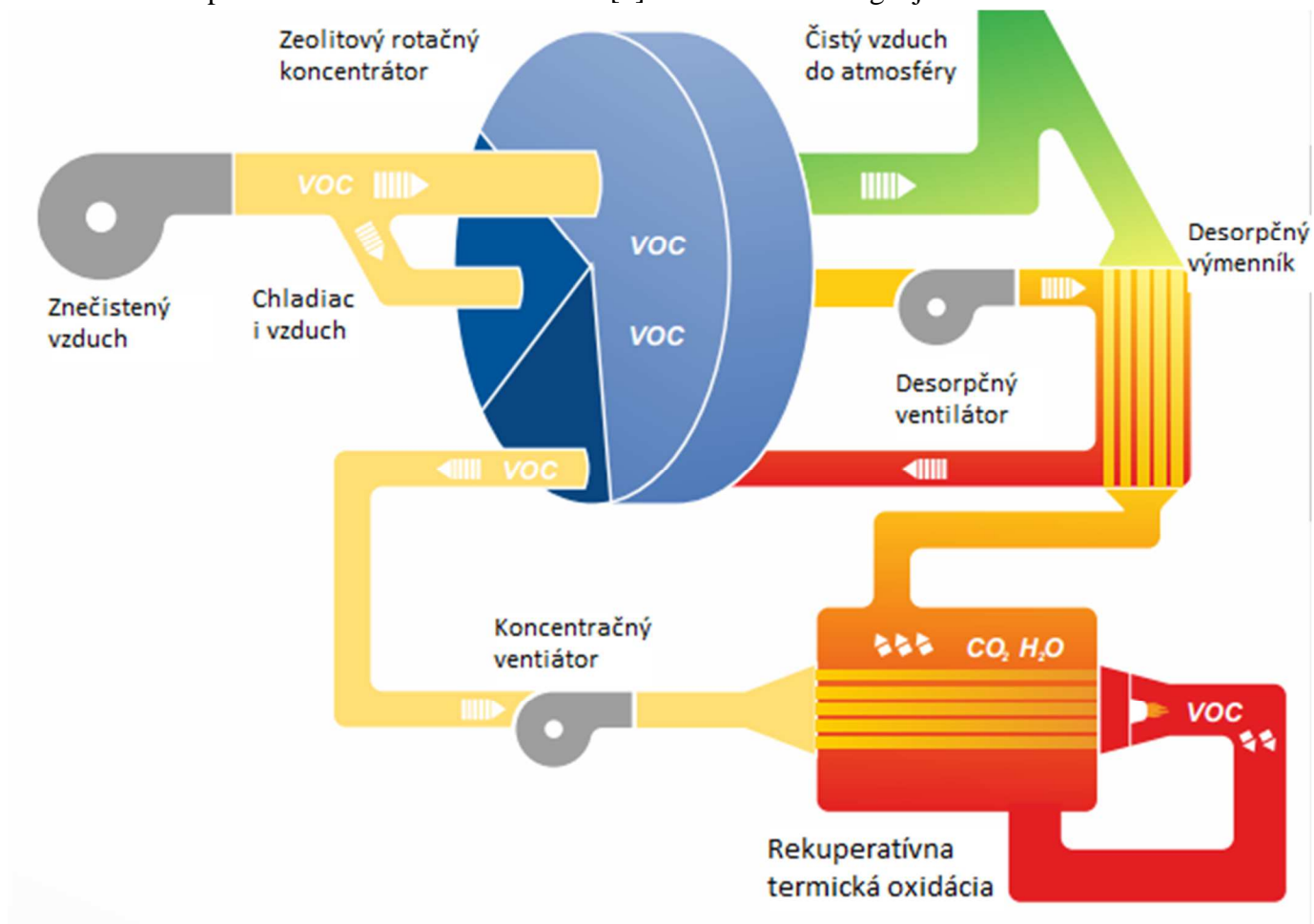
Obrázok 1.4 Schéma rekuperatívnej termickej oxidácie [8]

Regeneratívna termická oxidácia funguje taktiež na princípe priameho spálenia VOC látok v znečistenom vzduchu. Rozdiel je v zariadení, ktoré obsahuje v tomto prípade tri reaktorové komory (maximálne 5 komôr), prepájajúce kanály s armatúrami a ventilátor. Každá komora je vyplnená sypanými alebo voštinovými keramickými monolitmi, ktoré plnia úlohu integrovaného výmenníka tepla. Komory sa napájajú v hornej časti do spaľovacieho priestoru kde je plynový horák. Systém periodicky prepína prúdenie čistého vzduchu medzi komorami pričom jedna z nich je vždy vo fáze predávania tepla s účinnosťou 96 %, teda ohrieva čistený vzduch ktorý vstupuje do spaľovania. Takto skoro na provoznej teplote predhriaty vzduch je prídavným horákom dohrievaný na 750 – 850 °C. V tomto procese reagujú VOC a CO na CO₂ a H₂O za súčasného uvoľnenia tepla. Druhá komora akumuluje teplo, ktoré sa vyprodukuje horákom, oxidáciou VOC a posledná komora je vyplachovaná vyčisteným vzduchom. Technológia pracuje s 99 % účinnosťou čistenia VOC. Je vhodná pre stredne veľký obsah VOC a to 2 - 5 g/m³ pričom dokáže čistiť vzduch o objeme jednotiek až desiatky tisíc m³/h. Medzi hlavné výhody tejto technológie patria nízke provozné náklady, prijateľná cena, spoľahlivosť provozu a flexibilita použitia. Schéma technológie je znázornená na obr. 1.5 [8].



Obrázok 1.5 Regeneratívna termická oxidácia [8]

Nízke koncentrácie VOC obsiahnuté vo veľkých objemoch znečisteného vzduchu koncentruje **rotačný zeolitový koncentrátor** do malého objemu vzduchu s vysokým obsahom VOC. Do otáčajúceho sa adsorpčného disku, ktorý je rozdelený na 3 kruhové výseky, vchádza veľký objem znečisteného vzduchu. VOC sú v adsorpčnom výseku, ktorý je najväčší (až 80 % plochy), adsorbované na vrstve zeolitu nanesených na lamelách z minerálnych vlákien. Zeolit je syntetický hlinito – kremičitanový keramický adsorbent. Do chladiaceho výseku vstupuje časť čisteného vzduchu, ktorý je oddelený z hlavného prúdu a využitý ako chladiaci vzduch pre chladenie zeolitovej výplne pred jej znovu použitím. Tento chladiaci vzduch ďalej prechádza desorpčným výmenníkom a vstupuje znovu do koncentrátora do desorpčného výseku kde vytesňuje VOC z vrstvy zeolitu. Účinnosť záchytu VOC je 95 %. Takto koncentrovaný vzduch s VOC je ďalej termicky alebo katalyticky spálený. Vzniknuté teplo sa používa k predhriatiu vstupujúcich plynov a k nahriatiu desorpčného vzduchu. Táto technológia sa používa pre nízke koncentrácie VOC 50 – 50 mg/m³ vo veľkých objemoch vzduchu desiatok až stoviek tisíc m³/h. Najčastejšie sa takéto koncentrácie vyskytujú v lakovniach a laminovniach. Technológia je limitujúca vysokou vlhkosťou, vysokou teplotou vzduchu a obsahom tuhých prachových častíc, ktoré musia byť vyriešené pred použitím koncentrátora. Hlavné výhody koncentrátora je nízka cena vzhľadom k objemom spracovaného vzduchu, najnižšie provozné náklady zo spomenutých technológií, flexibilné použitie a dlhá životnosť zeolitu [8]. Schéma technológie je na obr. 1.6.



Obrázok 1.6 Zeolitový rotačný koncentrátor [8]

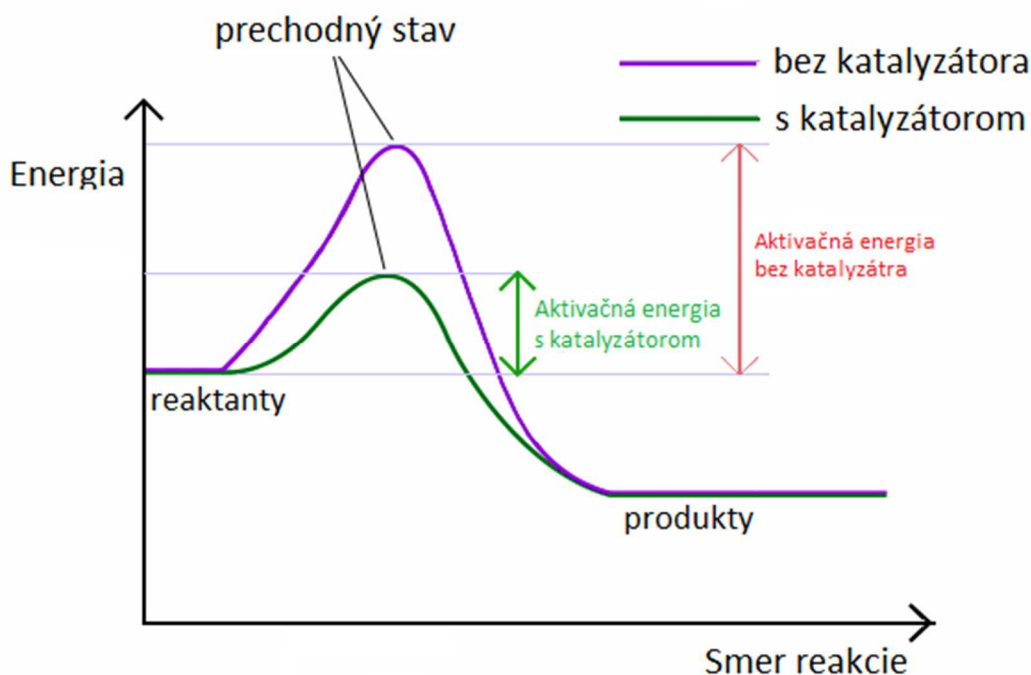
2 KATALYZÁTORY

V prvej kapitole bol zhrnutý princíp spaľovania odpadov a problematika škodlivých látok vznikajúcich pri spaľovaní. Keďže sa táto práca zaoberá tlakovými stratami nosičov katalyzátorov, budú ďalej priblížené typy nosičov ako aj možné využitie nových nosičov a podstata katalytických reakcií.

Katalyzátor je látka, ktorá urýchľuje chemickú reakciu, ale nie je reakciou spotrebovaná. To znamená, že katalyzátor môže byť na konci reakcie nezmenený. Pri chemických reakciách látok sa mení chemická väzba reakčných zložiek na nové väzby produktov. Pri tejto zmene väzieb vzniká tzv. prechodný stav látky, čo znamená chemický druh, ktorý nie je ani reaktant ani produkt, ale tzv. medziprodukt [16].



K vytvoreniu tohto prechodného stavu je potrebná energia – aktivačná energia E_A . Na obr. 2.1 je zobrazený priebeh reakcie.



Obrázok 2.1: znázornenie funkcie katalyzátora na chemickú reakciu [16]

Táto aktivačná energia sa dá považovať za bariéru, ktorú treba prekonať pri chemickej reakcii. Ak je aktivačná energia príliš vysoká, len málo molekúl má dostatočnú kinetickú energiu na to, aby sa zrazilo, vytvorilo prechodný stav a zreagovalo. Reaktanty s energiou menšou ako je E_A neprejdú cez prechodný stav aby sa stali produktami. Úlohou katalyzátora je znížiť aktivačnú energiu a tak uľahčiť reakciu. Vďaka katalyzátoru dochádza k zmenám väzieb pri premene reaktantov na produkty s menšou vstupnou energiou, a tak reaktanty prekonávajú prechodný stav omnoho ľahšie [16].

2.1 MONOLITICKÉ KATALYZÁTORY

Pre správnu funkciu denitrifikácie je potrebné zvoliť vhodný katalyzátor. Zdokonaľovanie katalyzátorov začalo v sedemdesiatych rokoch, pričom boli využité poznatky získané z katalytickej oxidácie amoniaku na katalyzátoroch na báze platínových kovov, katalytických vlastností oxidu kovov ako vanád, železo, chróm, meď a poznatky z čistenia výfukových plynov. Hlavný vývoj spočíval v zvýšení aktivity pri redukcii NO_x, znížení konverzie SO₂ na SO₃ a predĺženie životnosti z hľadiska mechanického a chemického. Mechanické opotrebenie ako abrázia popolčekom pri usporiadaní SCR hneď za kotlom a chemické (oxidy síry, stopové ťažké kovy, halogeny vo forme chloridov a fluoridov) kedy niektoré látky pôsobia ako katalytické jedy [17].

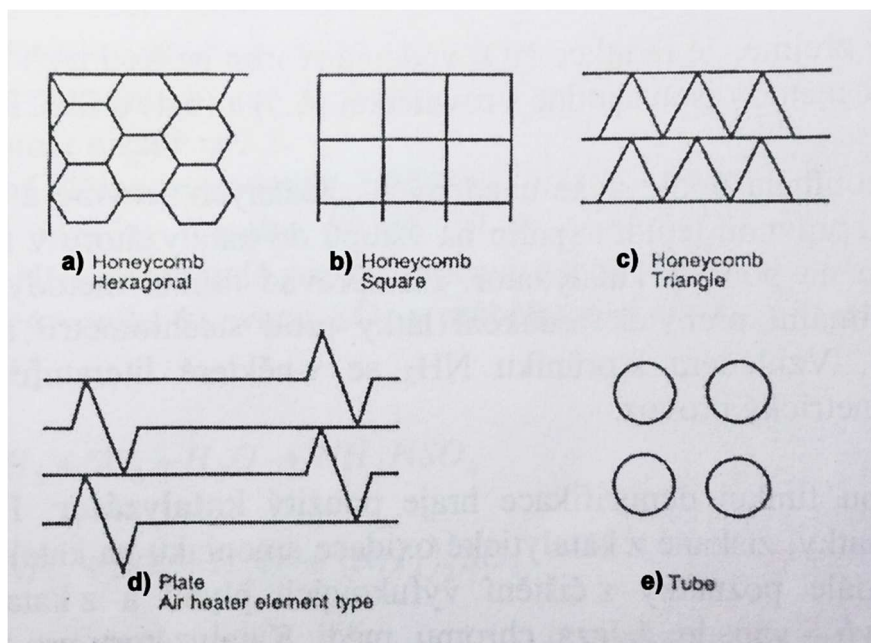
Na začiatku boli využívané katalyzátory na základe platínových kovov. Neskôr sa využívala ako hlavná aktívna zložka penta oxid vanadičný V₂O₅. Používali sa aj nosiče aktívnej zložky z oxidu hlinitého Al₂O₃, oxidu kremičitého SiO₂ a oxidu titaničitého TiO₂ z dôvodu zväčšenia aktívneho povrchu. Niektoré nosiče obsahovali zmes šiestich a viac oxidov kovov. V dnešnej dobe sa vyžívajú katalyzátory, využívajúce nosič z oxidu titaničitého TiO₂, na ktorý sú nanesené penta oxid vanadičný V₂O₅ a prídavok oxidu wolframového WO₃ a molybdenového MoO₃. Tento typ má označenie V₂O₅/TiO₂ [17].

Zeolitické katalyzátory sú ďalšou možnosťou použitia. Zmenšujú objem katalyzátora a podstatne zvyšujú aktivitu. Neobsahujú žiadne kovy a tak je ich likvidácia bezproblémová. Zeolity sú vysoko kryštalické aluminosilikáty, nazývané aj molekulové sitá. Toto pomenovanie je z dôvodu, že kryštály zeolitov tvoria vnútorne prepojený systém dutín o veľkosti 2 až 10 krát väčší než veľkosť molekúl NO, NH₃, SO₂ a O₂ [17].

Nízkoteplotnou karbonizáciou vhodného druhu uhlia vznikajú katalyzátory na báze aktívneho uhlia. Výhodou je, že pracujú pri nízkych teplotách.

Účinnosť SCR katalyzátora je charakterizovaná vlastnosťami ako aktivita, selektivita a životnosť. Životnosť je charakterizovaná chemickými vlastnosťami ako odolnosť voči katalytickým jedom a mechanickými vlastnosťami ako odolnosť voči oteru, pevnosť a odolnosť voči tepelnému namáhaniu [17].

Katalyzátor SCR musí mať špecifický tvar z dôvodu vysokých koncentrácií popolčeka v spalínach. Monolity (moduly) sú základným stavebným prvkom katalyzátora. Kanáliky môžu byť v tvare a) včelích plastov, b) štvorcového alebo c) trojuholníkového prierezu a tieto monolity sa nazývajú honeycomb obr. 2.3. Ďalšou možnosťou sú kanáliky, ktoré tvoria d) na sebe naskladané dosky (obr. 2.4) alebo e) paralelné trubky. Všetky varianty sú znázornené na obr. 2.2.

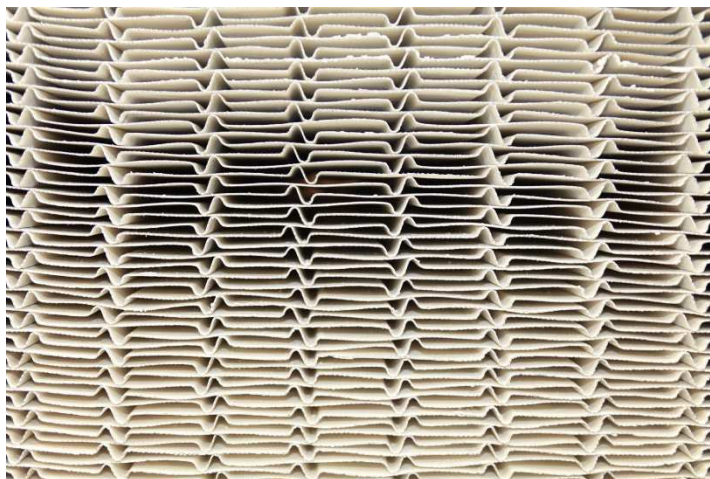


Obrázok 2.2 : tvar prierezovej plochy katalyzátorov [17]

Veľkosť kanálikov (pitch diameter) u typu honeycomb býva 4 až 10 mm, hrúbka steny okolo 1 mm a oba rozmery závisia od typu použitého paliva a umiestnenia katalyzátora v technológii. Bývajú štvorcového prierezu o rozmeroch od 150 x 150 mm až 350 x 350 mm. Dĺžka modulu v smere prúdu závisí od požiadavku na dostatočnú dobu zdržania plynu v katalyzátore pri bežných rýchlostiach 4 až 8 m/s v kanálikoch. Väčšinou je od desiatok cm až 1 m dlhý. Reaktory zložené z blokov katalyzátorov sú väčšinou štvorhranné skrine s vertikálnym prúdením a vytvárajú jednotlivé poschodia. Čelná plocha reaktoru sa volí podľa rýchlosti spalín v kanálikoch katalyzátora. Pri vysokých rýchlostiach dochádza k nárastu tlakovej straty a abrázií materiálu katalyzátora a naopak pri nízkych rýchlostiach dochádza k usádzaniu popolčeka, preto je vhodné voliť rýchlosti v rozsahu 4 až 8 m/s. Tlaková strata závisí od prevedenia, počtu poschodí, zanesenia popolčekom a dosahuje hodnôt 250 až 1000 Pa [17].



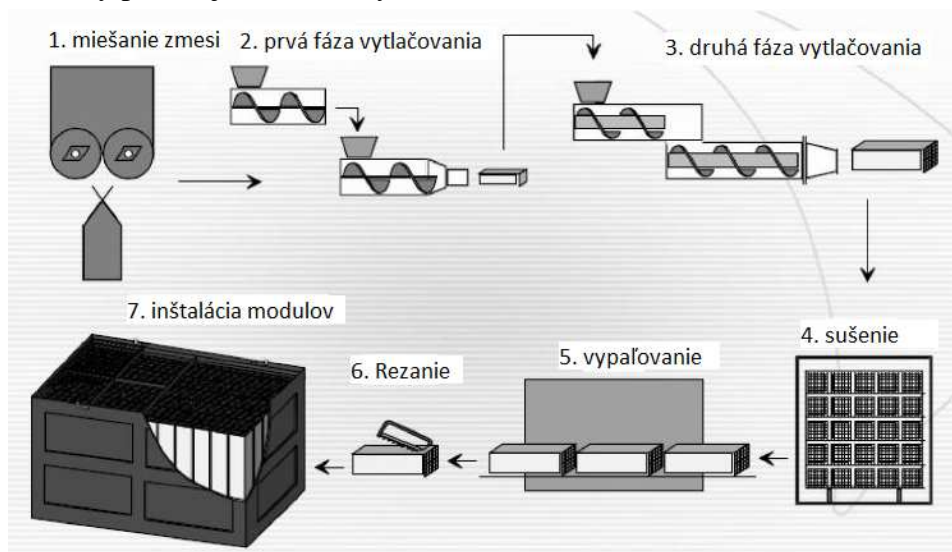
Obrázok 2.3 modul katalyzátoru typu honeycomb [18]



Obrázok 2.4 doskový modul katalyzátoru [18]

2.1.1 VÝROBA NOSIČOV HONEYCOMB

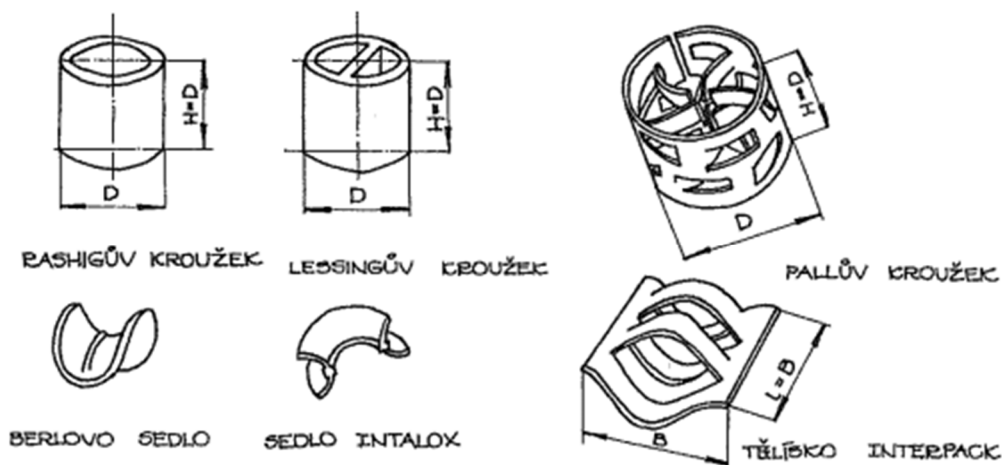
Výroba keramických nosičov HoneyComb prebieha pomocou procesu vytlačovania. Príprava materiálu pozostáva z mixu keramického prášku, vody a polymérnych pojív. Pridávaním vody a plastizujúcich aditív sa zmes dostatočne plastizuje pre proces vytlačovania. Plasticita zmesi je hlavná kvalitatívna charakteristika, a závisí od nej celková kvalita nosiča. Meranie plasticity prebieha na vysoko tlakom strihovom reometri. Takto pripravená zmes je vytlačovaná buď pomocou šroubového kontinuálneho alebo hydraulického diskontinuálneho vytlačovania v závislosti od požiadaviek na produkt. Kvalita vytlačovania má taktiež vplyv na kvalitu výsledného produktu a obvykle prebieha v dvoch fázach vytlačovania. Po tomto procese nasleduje vysušovanie a sintrovanie. Sintrovanie je proces vypekania predmetov vo vákuovej peci zložených z práškových častíc zahriatím na vysokú teplotu, avšak pod ich teplotou topenia, kedy dochádza k vzájomnému splynutiu práškových častíc. Po vychladnutí sa nosiče narezú na požadovanú veľkosť, čím sa proces ukončuje a sú pripravené k nanieseniu katalyzátora. Celý proces je znázornený na obr. 2.5 [32].



Obrázok 2.5 Proces výroby keramických nosičov HoneyComb [33]

2.2 SYPANÉ LOŽE

Ďalšou možnosťou nosičov katalyzátorov sú sypané lôže. Jedná sa o poréznu prepážku, ktorá sa skladá z objemu časticami partikulárnej látky. Medzi časticami vzniká voľná časť objemu, ktorým pretekajú spaliny. Výplňové telieska musia mať čo najväčší povrch pri malom objeme, možnosť hromadnej priemyselnej výroby a dostatočnú pevnosť a odolnosť pri rôznych pracovných podmienkach. Vyrábajú sa väčšinou z porcelánu, skla, kovu, plastu a sú na nich nanášané oxidy zmienené na začiatku tejto kapitoly. Najznámejšie výplňové telieska sú zobrazené na obr. 2.6. Okrem týchto teliesok sa používajú aj guľičky [19].



Obrázok 2.6 Výplňové telieska sypaných lôží [19]

Prúdenie spalín takýmto sypaným katalyzátorom je definované ako jednofázový tok poréznu prekážkou. Tlakové straty v sypanom lôži budú opísané na ďalšej kapitole.

2.2.1 VÝROBA NOSIČOV SYPANÝCH LOŽÍ

Výroba nosičov keramických teliesok alebo guľičiek prebieha obdobne ako u nosičov HoneyComb. Zmiešaním keramického prášku, aditív, vody a polymérnych pojív vznikne tvárna hmota, ktorá sa na automatickej mechanickej linke lisuje alebo pretláča matricou na požadovaný tvar. V niektorých krajinách sa aj v dnešnej dobe vyrábajú telieska ručne. Po procese tvarovania dochádza k vysušeniu teliesok a sintrovaniu v peci za vysokých teplôt. Po vychladnutí je výsledný produkt pripravený k expedícií.

2.3 VUKOPOR

Vukopor je obchodné označenie penových keramických filtrov (obr. 2.7) firmy LANIK s.r.o., ktorá sa okrem iného špecializuje na výrobu a predaj týchto filtrov, používaných v zlievarenstve, v petrochemickom a potravinárskom priemysle, v prvovýrobe hliníku a aj k dekoráčnym účelom. Ďalším možným použitím by mohlo byť využitie filtrov ako nosič katalyzátorov pri čistení spalín, pri čom je nutné poznať tlakovú stratu filtru, čo je predmetom tejto diplomovej práce.



Obrázok 2.7 Penové keramické filtre Vukopor [9]

Filtre Vukopor majú za úlohu filtrovať nečistoty z tekutého kovu ako piesok, struska, keramické vměstky, atď. Filter taktiež ukladňuje plnenie a teda znižuje turbulentné prúdenie na laminárne, čo spôsobí minimalizáciu reoxidácie kovu, a znižuje riziko erózie formy na miestach vtokovej sústavy. Ekonomické úspory a možnosť zmeny vo formovacej technológii sú dosiahnuté vďaka penovým filtrom, ktoré zjednodušujú vtokovú sústavu.

Z pohľadu filtrácie kovov sú penokeramické filtre najúčinnnejšie zo všetkých typov filtrov. V porovnaní s lisovanými filtrami sú penové filtre lepšie v kvalite filtrácie, ceny, kapacity a stability.

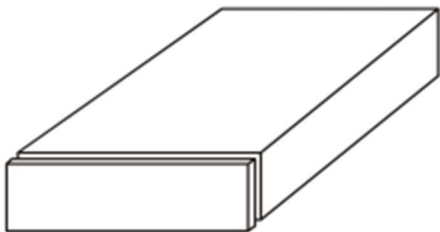
Penokeramický filter má štruktúru tvorenú systémom vzájomne prepojených buniek tvaru pentaedru, ktoré sú znázornené na obr. 2.8. Filtrácia takýmito tvarmi je výhodná pre hĺbkovú filtráciu a skľudnenie prúdenia kovu. Dochádza pri ňom k vzniku miestnych vírov a zmenám smeru prúdenia a tak sa vměstky často dotýkajú stien filtra a k ich zachyteniu.



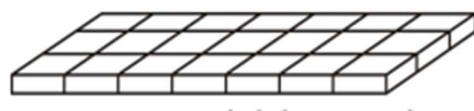
Obrázok 2.8 Prúdenie kovu v penovom filtri [9]

2.3.1 VÝROBA FILTROV VUKOPOR

Materiál filtrov vychádza z požiadavkou na jeho využitie. Vyrábajú sa replikačnou technológiou, čo znamená replikovanie už existujúceho tvaru bunkovej štruktúry polyuretánovej peny, ktorá tvorí základ penového filtra. Táto matrica z PUR peny má otvorené, navzájom prepojené póry (tzv. retikulovaná pena) tvaru pentaedru. Samotná výroba filtrov Vukopor pozostáva z bloku polyuretánovej peny o veľkosti cca 0,3 m x 2 m, ktorá je narezaná na platne hrúbky 15 – 50 mm (obr. 2.9). Následne sa z týchto platní vyreže matrica podľa požadovaných rozmerov filtra (obr. 2.10).

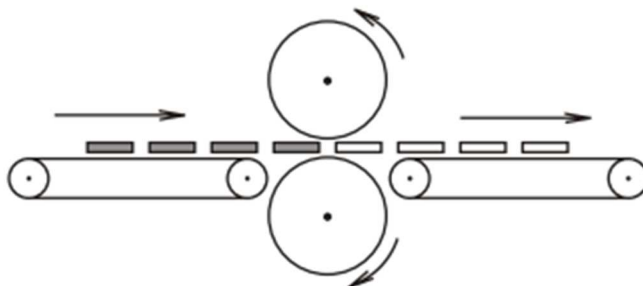


Obrázok 2.9 Blok PUR peny rezaný na platne [9]



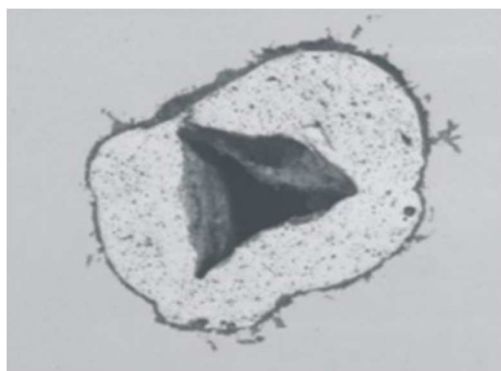
Obrázok 2.10 Rezanie matrice filtru z platne [9]

V ďalšom kroku je potrebné pripraviť keramickú suspenziu o správnej viskozite pre optimálne nanášanie na PUR penu. Viskozita suspenzie podobná hustej kaši sa dosiahne na vysoko – otáčkových disolverových miešачoch. Matrica filtra sa ponára do keramickej suspenzie a prebytočná suspenzia sa vytlačí medzi rotujúcimi valcami (obr. 2.11), vysuší a takto vzniká prvá vrstva keramiky na matrici [9].

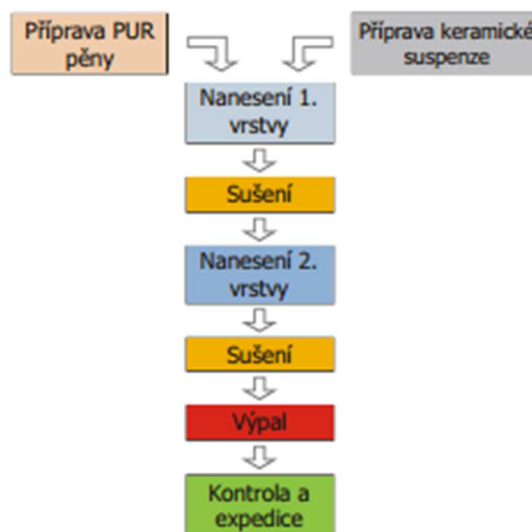


Obrázok 2.11 Vytlačanie prebytočnej suspenzie z matrice [9]

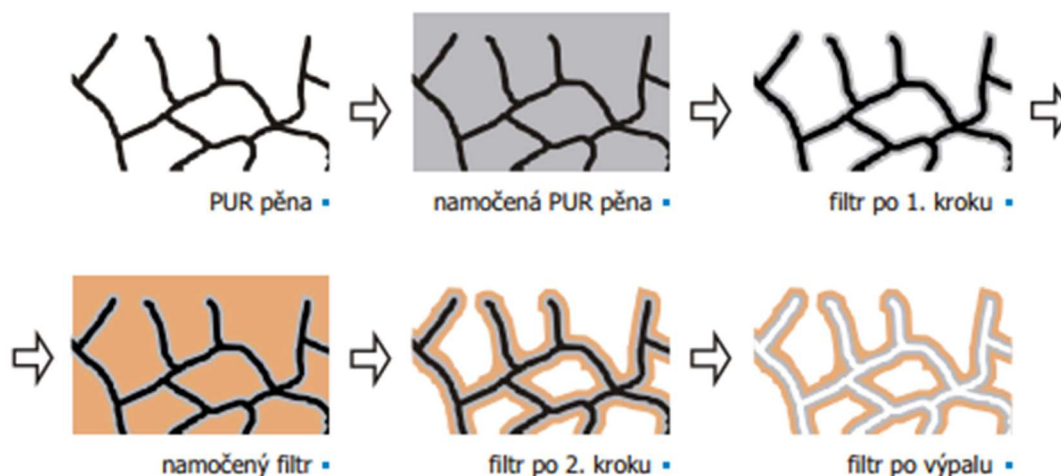
Keramická suspenzia sa nanáša v dvoch vrstvách z dôvodu dostatočne pevných vlákien, no aby zároveň nedošlo k zablokovaniu pórov. Druhá vrstva sa teda nanáša na už pevný a nepružný filter buď znovu ponorením do suspenzie a následným odstrednením, alebo sa suspenzia nanáša striekaním a následným sušením. Filter s nanesenými dvomi vrstvami keramiky pokračuje do vypaľovacej pece, kde dochádza k vyhoreniu matrice z PUR peny a k spevneniu keramiky vytvorením keramických väzieb. Na obr. 2.12 je znázornený rez vlákna filtru, kde vidno vzniknutú mikrodutinu po vyhorenej PUR pene. Obr. 2.13 znázorňuje schematické nanášanie vrstiev keramiky a obr. 2.14 celkový postup výroby filtra. Doskové filtre sú najbežnejší vyrábaný tvar, zložitejšie je vyrobiť duté priestorové tvary ako trubky, vlnovitý povrch dosiek a iné zložitejšie tvary, no existujú technológie, ktoré to umožňujú [9].



Obrázok 2.12 Rez vlákna filtra, dutina po PUR pene, keramické vlákno a okolná kovová matrica [9]



Obrázok 2.13 Postup výroby penových filtrov [9]



Obrázok 2.14 Nanášanie vrstiev keramickej suspenzie na PUR matricu, ktorá je znázornená čiernou farbou [9]

2.3.2 TYPY PENOVÝCH FILTROV

Materiály filtrov sú volené v závislosti na odlievanom materiály a to na báze Al_2O_3 , SiC , ZrO_2 a grafitu. Filtrujú sa materiály ako zliatiny neželezných kovov, liatina s lupienkovým a guľôčkovým grafitom a ocele. Firma Láník vyrába nasledujúce typy filtrov [9]:

VUKOPOR S – filtre na báze SiC pre filtrovanie liatiny a neželezných kovov pri teplotách do 1480°C . Je to univerzálny filter s najrozšírenejším použitím (obr. 2.15).

VUKOPOR A – filtre na báze Al_2O_3 používajú sa na filtrovanie zliatin hliníku, ostatných neželezných kovov pre zlievarenstvo a hutnícke aplikácie do 1350°C (obr. 2.16).

VUKOPOR LD – filtre na báze $\text{Al}_2\text{O}_3 - \text{C}$ sa používajú na jednorázovú filtráciu hliníka a jeho zliatin do teploty $850\text{ }^\circ\text{C}$ (obr. 2.17).

VUKOPOR HT – filtre na báze ZrO_2 sa používajú predovšetkým pre filtráciu vysokolegovaných oceľových zliatin využívaných v leteckom priemysle a energetike, kde je požadovaná vysoká chemická čistota a spoľahlivosť. Filtre ďalej filtrujú aj bežné ocele, a ich hlavná výhoda je vysoká mechanická pevnosť, a tak je možné použitie vo filtračných systémoch ťažkých a masívnych odliatkov (obr. 2.18).

VUKOPOR HTX – filtre na báze $\text{Al}_2\text{O}_3 - \text{C}$ sa používajú na filtráciu železných kovov až do teplôt $1700\text{ }^\circ\text{C}$. Filter je stabilný, má výbornú tepelnú vodivosť a nízku hmotnosť (obr. 2.19).



Obrázok 2.15 VUKOPOR S [9]



Obrázok 2.16 VUKOPOR A [9]



Obrázok 2.17 VUKOPOR LD [9]



Obrázok 2.18 VUKOPOR HT [9]



Obrázok 2.19 VUKOPOR HTX [9]

2.3.3 MERANIE PÓROVITOSTI KERAMICKÝCH FILTROV

Pórovitosť keramických filtrov je daná pórovitosťou použitej PUR peny a je dôležitým parametrom. Firma Láník určuje pórovitosť filtrov počtom pórov na dĺžkový palec s označením ppi (pores per inch). Platí, že čím je číslo ppi vyššie, tým má filter menšie póry. Filtre s pórovitosťou 10, 20 a 30 ppi sa používajú pre filtráciu kovu v zlievarňach, a filtre s 60 ppi sa využívajú pre filtráciu zliatin hliníka v taviarňach a hutiach. Z dôvodu prehľadnosti celej škály pórovitosti filtrov sa používa hodnota ppi, no nie je ju možné merať. Veľkosť pórov je meraná upraveným špeciálnym optickým mikroskopom a výsledky sú vyhodnocované softwarom, ktorý hodnoty porovnáva s etalonmi. Meranie prebieha len na PUR pene, na hotových filtroch toto meranie nie je možné. Priemerná hodnota veľkosti pórov sa presnejšie vyjadruje v mikrónoch (μm) a pohybuje sa v rozmedzí 1000 μm (80 ppi) až 4800 μm (10 ppi). Správna voľba pórovitosti ovplyvňuje veľkosť vmestkov, ktoré filter zachytí (účinnosť filtrácie), množstvo kovu, ktoré je možné prefiltrovať (kapacita filtru) a rýchlosť prúdenia kovu cez filter. Je snaha používať čo najhustejší filter z dôvodu účinnosti filtrácie [9].

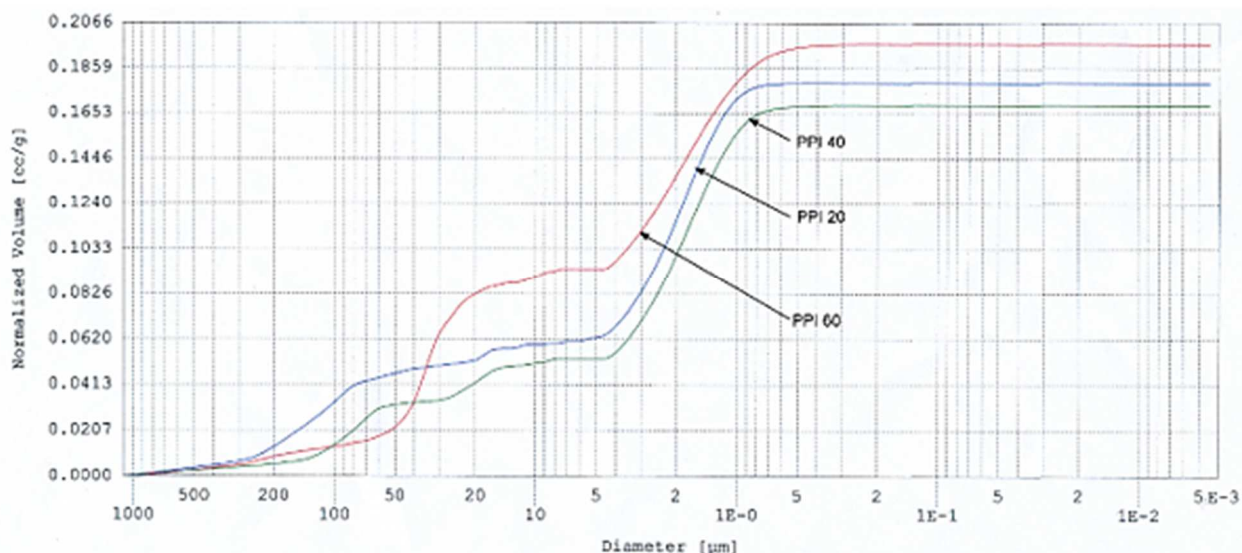
Pri výpočte tlakových strát, ale aj iných analýz na základe pórovitosti, nieje možné použiť pórovitosť vyjadrenú v ppi, z tohto dôvodu prebehla analýza štruktúry keramických filtrov v Stredoeurópskom technologickom inštitúte [10]. Analyzované boli filtre typu VUKOPOR A o pórovitosti ppi 20, 40 a 60 metódami na vyhodnotenie štruktúry filtrov:

- Stanovenie pórovitosti sýtiacou metódou a objemovej hmotnosti geometrickou metódou
- Stanovenie pórovitosti vtlačovaním ortuti, tzv. ortuťová porozimetria
- Stanovenie merného povrchu plynovou adsorpciou
- Skenovanie elektrónovej mikroskopie

Prvá metóda využíva Archimedov zákon v destilovanej vode podľa technickej normy „ČSN EN 623 – 2 Speciální technická keramika monolitická keramika. Všeobecné a strukturální vlastnosti. Část 2: Stanovení hustoty a pórovitosti“ [11]. Metóda stanovuje celkovú otvorenú pórovitosť zahrňujúcu póry keramického filtru a otvorené póry v keramických stenách. Keďže vzorka ppi 20 má veľké póry, hodnoty pórovitosti môžu byť ovplyvnené vyprázdňovaním kvapaliny z najväčších pórov pri vážení nasýteného vzorku. Toto môže viesť k podhodnoteniu

pórovitosti u tohto vzorku. Vzorka ppi 40 je podobného charakteru a v pórovitosti sa líši len málo. Oba vzorky ppi 20 a 40 sú menej porézne ako najhustejšia štruktúra ppi 60 [10].

Ortuťová porozimetria vtlačá ortuť do pórov vzorku. Vyvinutý tlak potrebný k vtlačeniu ortuti je úmerný veľkosti pórov. Výsledky merania sú znázornené na grafe na obr. 2.20, ktorý znázorňuje závislosť normalizovanej vtlačenej ortuti na veľkosti pórov všetkých troch vzoriek.

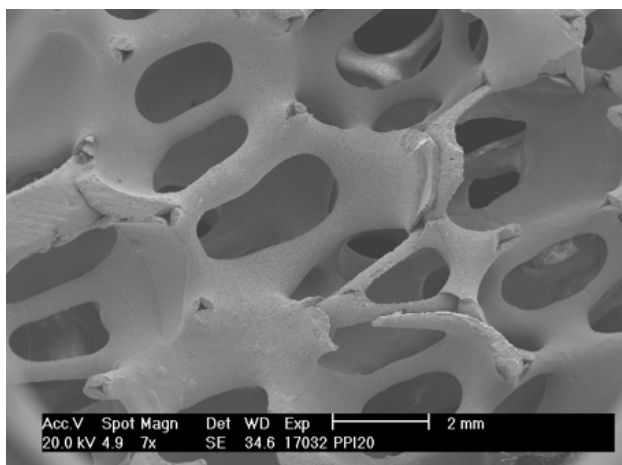


Obrázok 2.20 Závislosť objemu vtlačenej ortuti na veľkosti pórov pre tri vzorky [10]

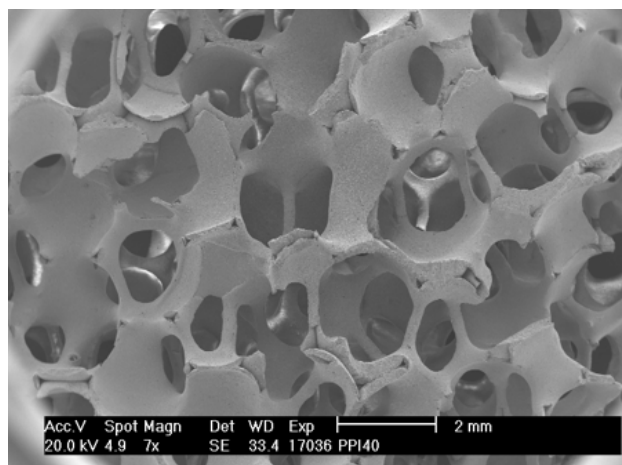
V oblasti grafu, kde krivky stúpajú (objem vtláčovanej ortuti rastie), sa nachádzajú póry daných veľkostí. Naopak v miestach, kde sa objem ortuti nemení, sa póry daných veľkostí nenachádzajú. Póry sa teda vyskytujú v oblasti od 1 mm do 20 μm (predpokladané makropóry) a od 5 μm do 0,5 μm (predpokladaná otvorená pórovitosť keramických stien). V oblasti 20 – 5 μm sa vo vzorkách nevyskytovali póry týchto veľkostí z dôvodu malého rastu objemu vtláčovanej ortuti. Najväčšie póry 0,8 – 1 mm vo vzorkách ppi 40 a 20 presiahli detekčný limit zariadenia, čo mohlo spôsobiť skreslenie celkového množstva vtláčenej ortuti v tejto oblasti. Z analýzy vyplýva, že najviac pórov o veľkosti 2 μm je na keramickej stene filtra a pórovitosť na stene bola u všetkých vzorkách podobná. Meranie veľkosti makropórov neodpovedá veľkosti pórov, ale veľkosti prepojení medzi bunkami alebo dutinám po vyhorenej PUR pene. Veľkosť týchto makropórov sa vo vzorkách líšila, vo vzorke 60 ppi bol najväčší objem makropórov a u ostatných vzorkách sa znižoval. Najviac pórov bolo o veľkosti medzi 0,1 mm (20 ppi) a 0,04 mm (60 ppi) [10].

Adsorpciou dusíka sa meral merný povrch vzorkou pomocou päťbodovej BET metódy. Veľkosť makropórov nemal vplyv na hodnotu merného povrchu, ktorý bol tvorený vnútornou pórovitosťou keramických stien. Hodnoty merného povrchu pre vzorky s veľkými (20 ppi) a malými makropórmi (60 ppi) sa nelíšili a dosahovali hodnôt 0,7 m²/g, čo sú hodnoty na hranici možností merania prístroja a metódy [10].

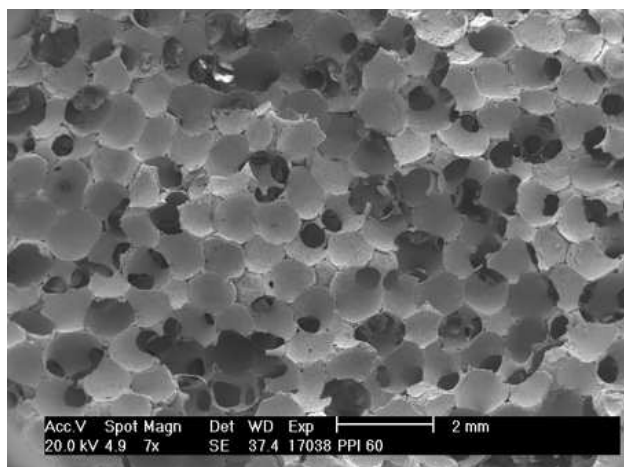
Elektrónová mikroskopia vzoriek bola prevedená elektrónovým rastrovacím mikroskopom. Získané snímky (obr. 2.21 – 2.23) porovnávajú makroštruktúry keramických filtrov líšiace sa veľkosťou makropórov a hrúbkou steny. Póry sa zmenšovali od 2 mm (20 ppi) do 0,9 mm (60 ppi). Na snímkach je zrejmé, že sa póry prepájajú s ostatnými pórmalými prepojeniami, čím sa potvrdila analýza vťahovaním ortuti. Významnú vnútornú pórovitosť keramického materiálu potvrdili snímky povrchu filtrov (obr. 2.24) v porovnaní snímky povrchu filtra honeycomb (obr. 2.25), ktorý má pórovitosť len zanedbateľnú [10].



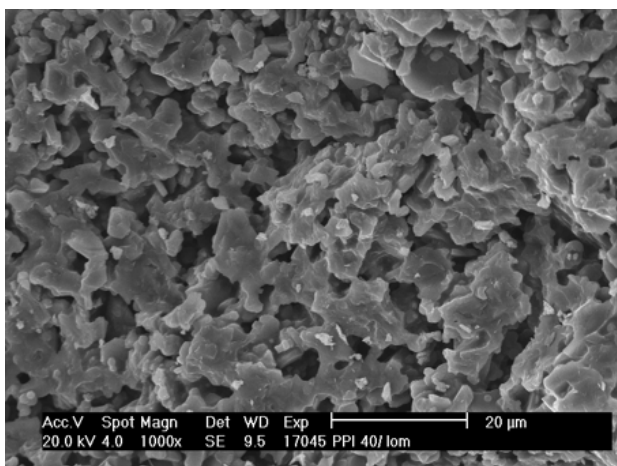
Obrázok 2.21 Snímka štruktúry filtra 20 ppi [10]



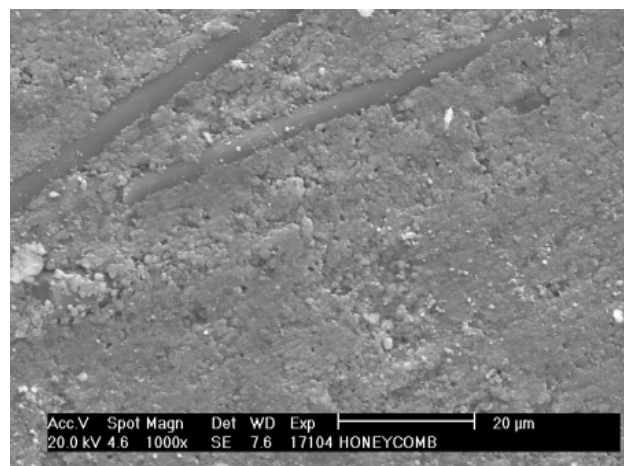
Obrázok 2.22 Snímka štruktúry filtra 40 ppi [10]



Obrázok 2.23 Snímka štruktúry filtra 60 ppi [10]



Obrázok 2.24 Vnútorná pórovitosť steny
keramického filtra 40 ppi [10]



Obrázok 2.25 Vnútorná pórovitosť povrchu filtra
honeycomb [10]

Z analýzy vyplýva, že keramický materiál všetkých troch vzoriek filtrov je podobný a má značnú otvorenú pórovitosť. Líšili sa veľkosťou aj objemom makropórov. Výsledky sú zhrnuté v tab. 3.1 a na ich základe budú vypočítané tlakové straty filtrov VUKOPOR typu A.

Tabuľka 2.1 Otvorená pórovitosť keramických filtrov [10]

Keramický filter	Otvorená pórovitosť [%]	Priemer bunky [mm]
60 ppi	88,8	0,9
40 ppi	81,5	0,8
20 ppi	70,9	1,5

3 TECHNOLOGIE VYUŽÍVAJÚCE KATALYTICKÉ DEJE

V kapitole 1.2 boli opísané škodlivé látky vznikajúce pri spaľovaní komunálneho odpadu. Pre potreby tejto diplomovej práce bude venovaná pozornosť len oxidom dusíka NO_x a spôsobu ich redukcie.

Tvorbu emisií NO_x je možné redukovať dvomi hlavnými spôsobmi, a to

- Primárne metódy, predchádzanie vzniku NO_x: znižovanie spaľovacej teploty, zníženie koncentrácie O₂ v plameni a zníženie doby zdržania spalín v spaľovacej komore.
- Sekundárne metódy, odstraňujúce už vzniknuté NO_x: selektívna katalytická a nekatalytická redukcia a mokré čistenie [25].

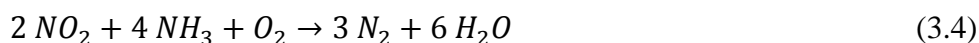
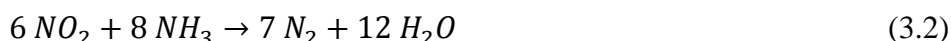
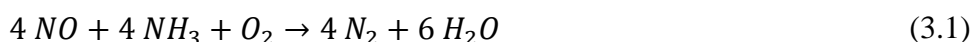
Ďalšie kapitoly sa budú venovať len sekundárnym metódam využívajúce katalytické deje.

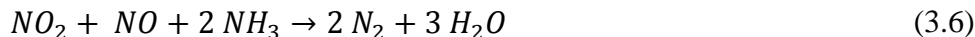
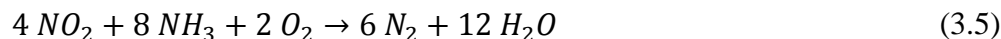
3.1 SELEKTÍVNA KATALYTICKÁ REDUKCIA SCR

Metóda SCR bola vyvinutá v 70. rokoch v Japonsku a dnes je vo svete najrozšírenejšia sekundárna denitrifikačná metóda. Sekundárna preto, lebo ako prvá metóda denitrifikácie sa väčšinou používa selektívna nekatalytická redukcia, ktorá prebieha v teplotnom pásme 850 až 1050 °C bez prítomnosti katalyzátoru. SCR metóda využíva prítomnosť katalyzátoru pri teplotách len 250 až 400 °C. Dochádza pri nej k redukcii NO, alebo NO₂ na N₂ pri použití redukčného činidla [17]:

- plynňý amoniak NH₃,
- vodný roztok amoniaku (cca 30 % roztok), tzv. čpavková voda
- vodný roztok močoviny (cca 40 – 50 % roztok).

Redukčné činidlo je nastrekované za kotlom do priestoru s požadovanou teplotou pred katalyzátor. NO_x sú selektívne redukované, to znamená, že sa redukujú len oxidy dusíku vo vhodne zvolenom katalyzátore pomocou plynňého amoniaku a za prítomnosti kyslíku. Literatúra uvádza mnoho redukčných rovníc, no za najdôležitejšie sa považujú nasledovné [17]:





Všetky rovnice majú ako produkty neškodné N_2 a H_2O . Pre čo najúčinnnejšiu redukciu NO_x je potrebné nájsť správnu kombináciu použitého katalyzátora a teploty spalín na jeho vstupe. Pri správnej funkcii tejto metódy je potom potrebný len minimálny prebytok redukčnej látky proti stechiometrii a dosiahnutá účinnosť je viac ako 90 %.

Selektivita je najdôležitejšia požiadavka na vlastnosť katalyzátora. Spočíva v tom, že pri správnej teplote za prítomnosti katalyzátora zabraňuje vzniku nežiadúcich reakcií a prebiehajú žiadané redukčné reakcie (3) až (8). Zabraňuje teda nežiadúcim reakciám ako oxidácia SO_2 na SO_3 podľa rovnice (3.7) [17]



SO_3 následne reaguje na hydrogensíran amonný NH_4HSO_4 podľa rovnice (3.8) alebo na kyselinu sírovú (3.9)



NH_4HSO_4 spôsobuje zanášanie na stenách technologického celku a má korozívne účinky. Koróziu spôsobujú aj pary H_2SO_4 . Katalyzátor zabraňuje aj spätnej tvorbe NO podľa rovnice (3.10)

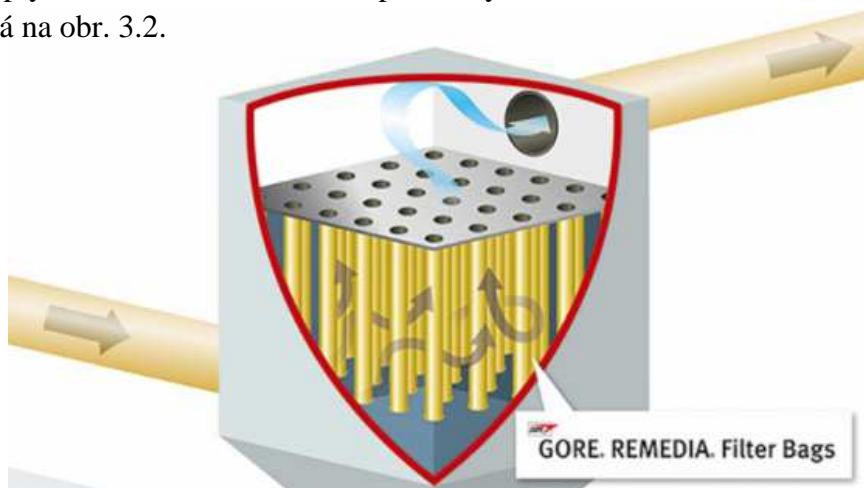


Umiestnenie katalyzátora v technologickom celku čistenia spalín má veľký vplyv na jeho životnosť a funkciu. Existujú tri možnosti umiestnenia SCR technológie:

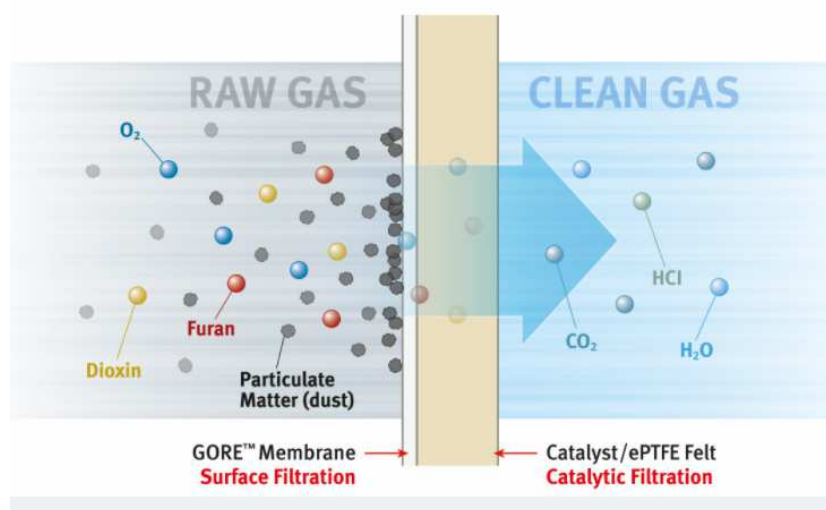
- vysoko prašné usporiadanie – reaktor s katalyzátorom je umiestnený za kotlom medzi ekonomizérom a výmenníkom pre predohrev spaľovacieho vzduchu. Životnosť tohto usporiadania je 3 až 4 roky.
- nízko prašné usporiadanie – medzi ekonomizérom a katalyzátorom je umiestnený odlučovač prachu. Táto varianta je z hľadiska veľa nevýhod najmenej výhodná.
- koncové usporiadanie – SCR je umiestnená až na úplnom konci technológie, kde odpadajú problémy s koróziou, katalytickými jedmi a prenikania NH_3 . Toto usporiadanie má životnosť až 5 rokov a je najvýhodnejšie [17].

3.2 KATALYTICKÁ FILTRÁCIA

Katalytická filtrácia využíva selektívnu katalytickú redukciu SCR na keramickom alebo látkovom filtri. Tieto filtre sú porézne prepážky s vloženým katalyzátorom, kde prebieha spolu s SCR zároveň aj odstraňovanie tuhých znečisťujúcich látok. Látkové filtre REMEDIA sú úspešne využívané po veľmi dlhú dobu prevádzky (obr. 3.1). Filter odstraňuje veľmi nebezpečné škodliviny PCDD a PCDF spomenuté v kap. 1.2. Taktiež po vstrekaní redukčného činidla amoniaku na filtre prebieha SCR a teda redukcia NO_x. Filter má konštrukciu v podobe rukávcoz látky GORE-TEX, v ktorej je všitá membrána z expandovaného polytetrafluoretylenu ePTFE, na ktorej je nanosený katalyzátor, napr. V₂O₅-WO₃/TiO₂. Filter má teplotný pracovný rozsah 220 – 240 °C, čo je značný teplotný rozdiel oproti štandardnej teplote SCR 175 – 600 °C. Membrána z ePTFE spolu s katalyzátorom zachytáva až 99,6 % popolčeka a ťažkých kovov a až 98,8 % dioxínov. Materiál membrány má viacero výhod a to nízku tlakovú stratu vďaka poréznej štruktúre, na povrchu dochádza k odprášeniu a tým zabraňuje zanášaniu, materiál má vysokú odolnosť voči chemickým a tepelným vplyvom, ÚV žiareniu a absorpcií vody [26]. Redukcia NO_x a filtrácia popolčeka je znázornená na obr. 3.2.



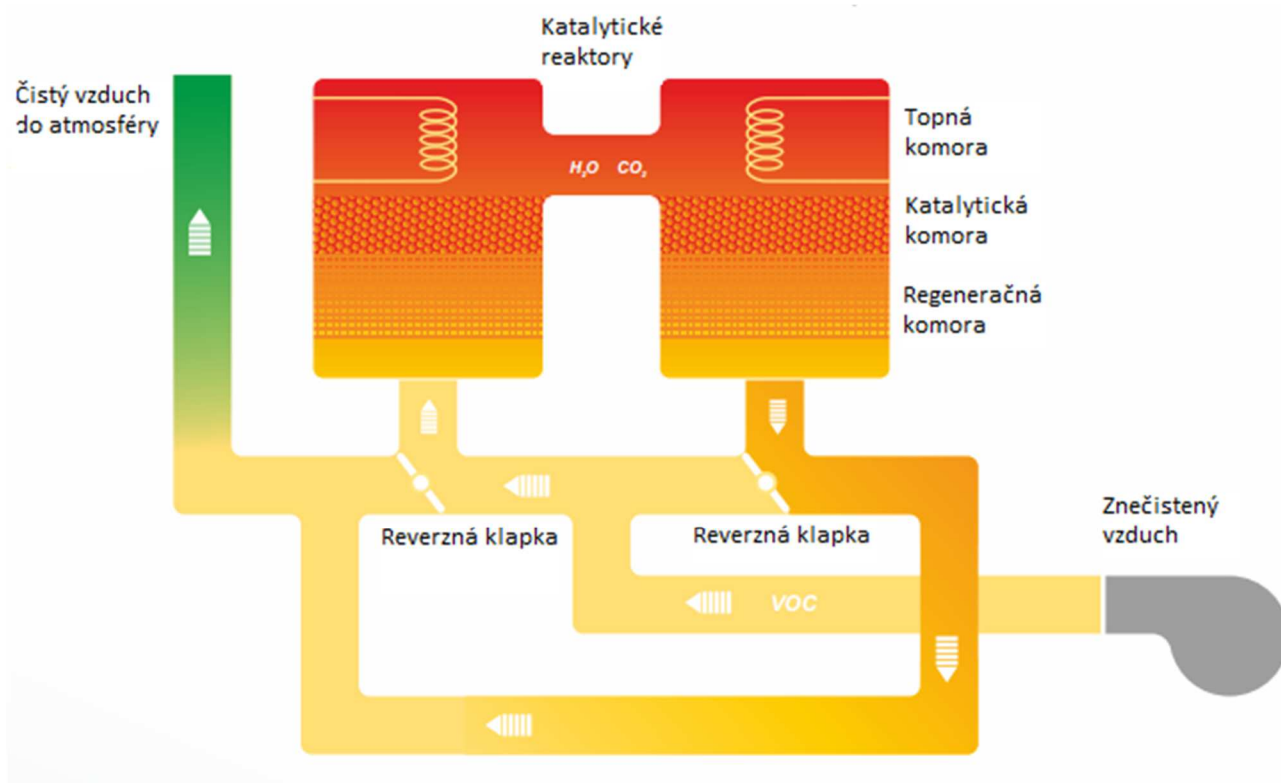
Obrázok 3.1 Látkové filtre REMEDIA umiestnené v zariadení [27]



Obrázok 3.2 Redukcia NO_x na katalytickej vrstve a filtrácia popolčeka [27]

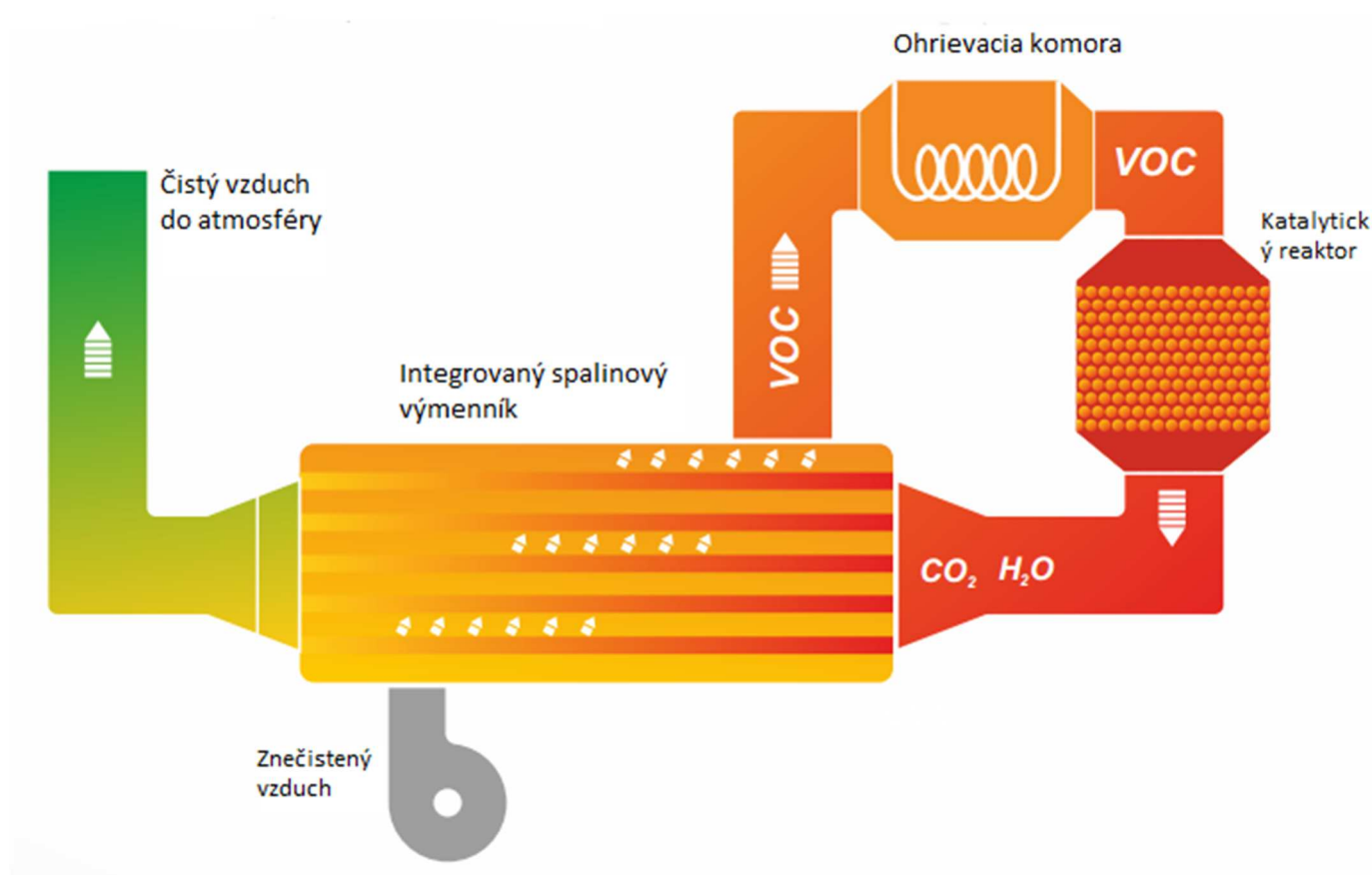
3.3 KATALYTICKÁ OXIDÁCIA VOC

Regeneratívna katalytická oxidácia je technológia využívajúca dva reaktory, ventilátory a expanznú časť, v ktorej dochádza k vyrovnávaniu koncentračných výchylek v systéme. Keramická výplň ako Raschigove krúžky alebo keramické voštiny sa nachádzajú v dolnej, regeneračnej, časti oboch reaktorov. Nad touto výplňou je katalytická komora s granulovanou výplňou alebo voštinami, na ktorých je nanosená vrstva katalyzátoru. V hornej časti, kde sú oba reaktory spojené spojovacím tunelom sa nachádzajú ohrevné komory s elektrickými ohrevnými telesami alebo horákom. Princíp je založený na periodickom striedaní smeru prúdenia znečisteného vzduchu medzi reaktormi. Vzduch sa najprv ohreje na provoznú teplotu katalytickej reakcie vďaka prechodu cez keramickú výplň v prvom reaktore v regeneračnej komore. Následne nahriaty vzduch prechádza cez katalytické výplne prvého a druhého reaktoru kde sú VOC oxidované na CO_2 a H_2O za uvoľnenia reakčného tepla. Takto nahriaty vzduch ďalej prúdi cez keramickú výplň druhého reaktoru, kde odovzdáva teplo s účinnosťou 96 % a tým sa ochladí. Týmto smerom dochádza k chladnutiu keramickej výplne prvého reaktoru a k ohrevu výplne druhého reaktoru, preto dochádza k periodickému striedaniu smeru prúdenia. Technológia pracuje s účinnosťou 99 % čistenia VOC. Technológia je vhodná pre nízke a stredné koncentrácie VOC $0,3 - 3 \text{ g/m}^3$ a čistí jednotky až desiatky tisíc m^3/h . Medzi hlavné výhody patrí možnosť odstaviť zariadenie bez predošlého vychladnutia. Po odstávke je možné zariadenie naštartovať bez predošlého nahrievania. V oblasti spaľovania dosahuje najnižšie provozné náklady, vysoká účinnosť, spoľahlivosť, prijateľná cena a flexibilita sú hlavné výhody technológie [8].



Obrázok 3.3 Regeneratívna katalytická oxidácia [8]

Rekuperatívna katalytická oxidácia je jednoduchý systém, v ktorom sa nachádza len jeden katalytický reaktor s katalytickou vrstvou granulovanej náplne alebo voštinovými monolitmi. Znečistený vzduch s VOC látkami prechádza najskôr výmenníkom tepla, kde sa predhreje, ďalej pokračuje do ohrievacej komory (plynový horák, elektrické ohrievacie teleso), kde sa ohreje na teplotu potrebnú ku katalytickej reakcie nad 300 °C. Takto predhriaty vzduch vchádza do katalytického reaktoru a prechádza cez katalytické vrstvy a je oxidovaný na CO₂ a H₂O pri účinnosti 99 % čistenia. Pri takto nízkej teplote katalytickej oxidácie nevznikajú oxidy dusíku. Teplo čistého vzduchu sa odovzdáva vo výmenníku tepla znečistenému vzduchu. Táto technológia čistý vzduch s obsahom VOC 2 – 6 g/m³ a jednotky až desiatky tisíc m³/h. Hlavné výhody je nízka cena, spoľahlivosť, flexibilita použitia a nízke prevádzkové náklady [8].



Obrázok 3.4 Rekuperatívna katalytická oxidácia [8]

4 TLAKOVÉ STRATY

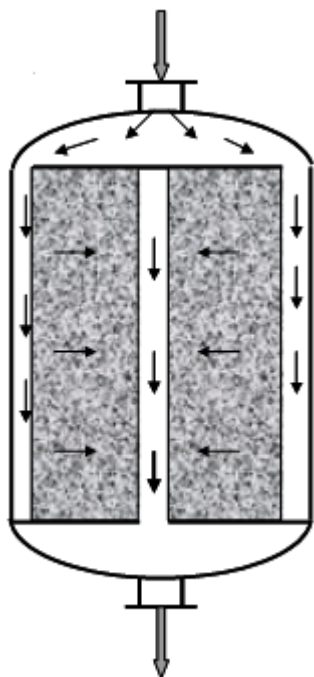
Pre správny návrh ventilátoru a celkovej ekonomickej bilancie je nutné poznať tlakovú stratu v systéme čistenia spalín. Táto diplomová práca sa zameriava na tlakové straty v katalyzátore, preto bude táto kapitola venovaná tejto téme.

Pri navrhovaní hlavných rozmerov katalytických reaktorov je potrebné dodržiavať vhodný tlakový spád. Spodná hranica hydraulického odporu je volená s ohľadom na brzdenie vonkajšej difúzie. Je potrebné zabezpečiť určitú rýchlosť prúdenia plynnej zmesi katalytickým ložom, ktorá umožňuje dosiahnuť dostatočnú turbulenciu pre prestup tepla a hmoty medzi hlavným prúdom a sypanou náplňou katalyzátoru. Naopak pri vysokých tlakových odporoch dochádza k chveniu katalytického lože, čím dochádza k oteru častíc sypaného lože a k možnému drveniu a následnému ďalšiemu zvyšovaniu hydraulických odporov. Dodržanie horná hranica hydraulického odporu predstavuje určitú rezervu pre zvýšenie tlakovej straty reaktorom počas prevádzky [20].

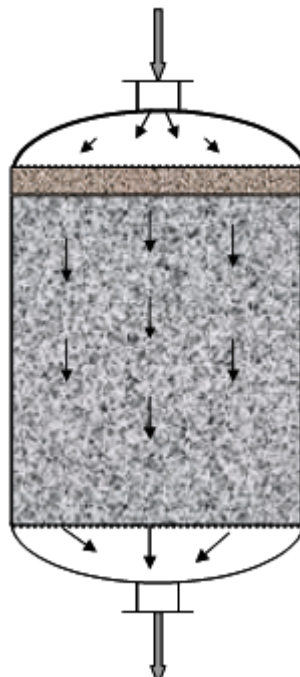
V jednotlivých podkapitolách sa nachádzajú vzorové výpočty, ako aj súhrn použitých konštánt.

4.1 VÝPOČET TLAKOVEJ STRATY SYPANÉHO LOŽE

Sypané lože sa používajú v aparátoch ako reaktory a adsorbéry, a podľa spôsobu prúdenia tekutiny sypaným ložem existujú dva typy aparátov, s axiálnym a radiálnym tokom [20] (obr. 4.1 a 4.2).



Obrázok 4.2 Radiálny tok [20]



Obrázok 4.1 Axiálny tok [20]

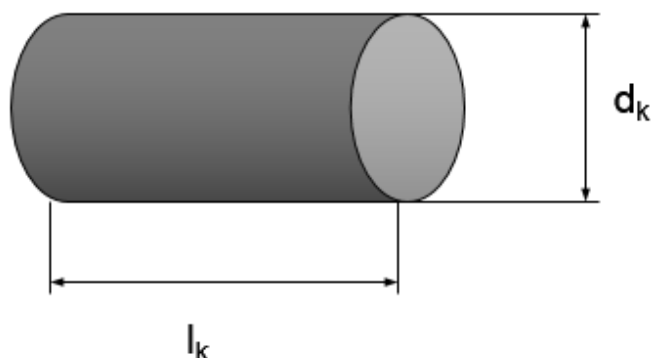
V laboratórií je postavený reaktor s axiálnym tokom, a tak budú výpočty tlakových strát riešené len pre axiálny tok. Ako prvá metóda výpočtu je **Levyho rovnica** (4.1) [21]

$$\frac{|\Delta p|}{L} = \frac{f_m \cdot 2 \cdot G^2 \cdot (1 - \varepsilon)^{3-n}}{D_p \cdot \rho \cdot \theta_s^{3-n} \cdot \varepsilon^3} \quad (4.1)$$

kde

Δp	[Pa]	tlaková strata,
G	[kg.m ⁻² .s ⁻¹]	hustota hmotnostného toku plynu ložem,
μ	[Pa.s]	dynamická viskozita plynu,
D_p	[m]	charakteristický rozmer častice sypaného lože,
ρ	[kg.m ⁻³]	hustota tekutiny,
L	[m]	výška sypaného lože,
ε	[-]	medzerovitosť sypaného lože,
$\Delta p/L$	[Pa/m]	tlakový spád v sypanom loži,
Φ_s	[-]	tvarový faktor,
n	[-]	exponent získaný z grafu v závislosti na modifikovanom Re,
f_m	[-]	parameter získaný z grafu v závislosti na modifikovanom Re.

Ako prvé pri výpočtu podľa Levyho je potrebné určiť charakteristický rozmer častíc D_p sypaného lože podľa rovnice (4.2) [21] s charakteristickými rozmermi častice podľa obr. 4.3.



Obrázok 4.3 Charakteristické rozmery častice v tvare výtlačku [20]

$$D_p = \frac{3 \cdot d_k \cdot l_k}{d_k + 2 \cdot l_k} \quad (4.2)$$

kde

d_k [m] priemer výtlačku,
 l_k [m] dĺžka výtlačku.

Ďalej sa určí tvarový faktor (4.6), ktorý je definovaný ako pomer povrchu gule (S_{gule}) s ekvivalentým priemerom D_p (4.3) k reálnemu povrchu častice katalyzátoru (S_{real}) (4.5) [21]

$$S_{gule} = \pi \cdot D_p^2 \quad (4.3)$$

$$S_{real} = \pi \cdot d_k \cdot \left(l_k + \frac{d_k}{2} \right) \quad (4.5)$$

$$\theta_s = \frac{S_{gule}}{S_{real}} \quad (4.6)$$

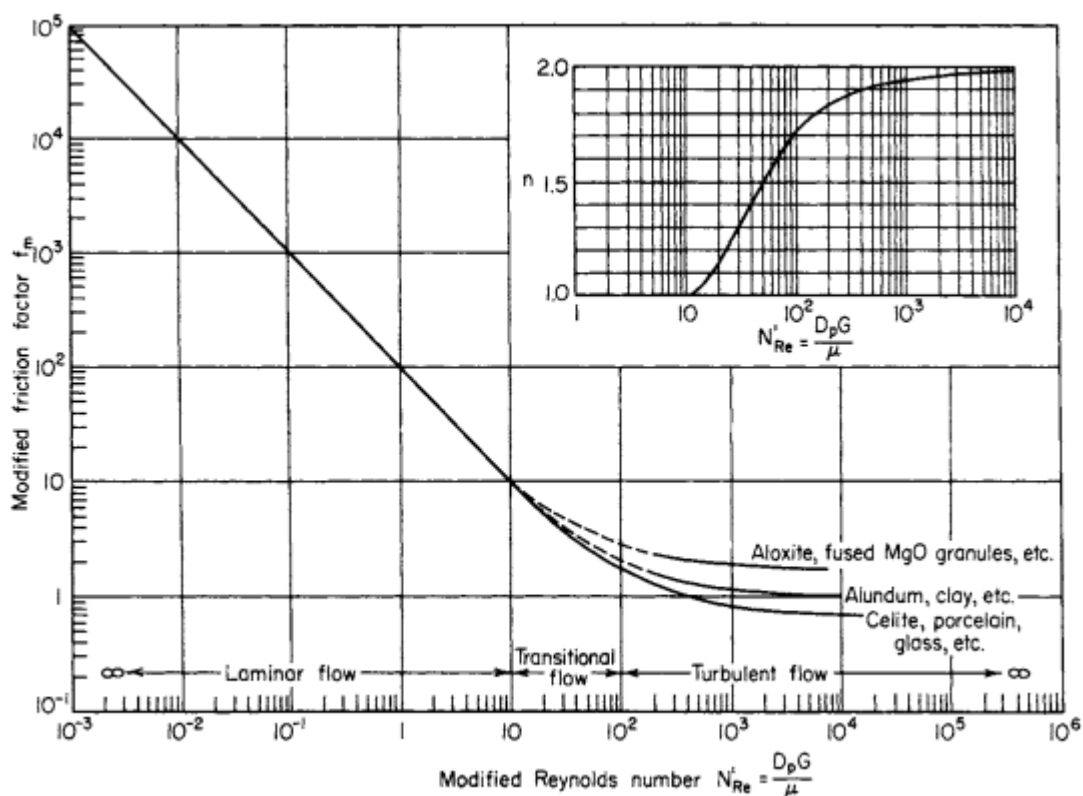
Vypočíta sa modifikované Reynoldsovo číslo (4.7) [21]

$$Re_m = \frac{D_p \cdot G}{\mu} \quad (4.7)$$

kde

Re_m [-] modifikované Reynoldsovo číslo,
 n [-] parameter,
 f_m [-] modifikovaný trecí koeficient.
 S_{gule} [m²] povrch gule,
 S_{real} [m²] reálny povrch častice katalyzátoru.

a podľa výsledného modifikovaného Reynoldsovho čísla sa z grafu na obr. 4.4 určí typ prúdenia a výpočty parametru „n“ a modifikovaného trecieho koeficientu f_m .



Obrázok 4.4 Modifikovaný trecí koeficient a parameter „n“ v troch oblastiach prúdenia [21]

Pre určenie parametru „n“ slúžia rovnice (4.8), (4.9) a (4.10) [21] podľa daných intervalov modifikovaného Reynoldsovo čísla

$$0 < Re_m < 170 \quad n = 0,3168 \cdot \ln(Re_m) + 0,2216 \quad (4.8)$$

$$170 < Re_m < 1\,000 \quad n = 0,0735 \cdot \ln(Re_m) + 1,4429 \quad (4.9)$$

$$1\,000 < Re_m < 10\,000 \quad n = 0,0168 \cdot \ln(Re_m) + 1,8313 \quad (4.10)$$

Taktiež sa určí modifikovaný trecí koeficient podľa rovníc (4.11), (4.12) a (4.13) [21] a podľa Re_m

$$0,001 < Re_m < 20 \quad f_m = 106,7 \cdot Re_m^{-0,988} \quad (4.11)$$

$$20 < Re_m < 600 \quad f_m = 17,271 \cdot Re_m^{-0,418} \quad (4.12)$$

$$600 < Re_m < 10\,000 \quad f_m = 1,8704 \cdot Re_m^{-0,065} \quad (4.13)$$

Po určení všetkých neznámych veličín je možné vypočítať tlakovú stratu podľa rovnice (24).

Ďalším spôsobom výpočtu tlakových strát sypaného lože s axiálnym tokom plynu je podľa **Colbun- Chilton** vzťahu (4.14) [20], ktorý nezahrňuje medzerovitosť daného lože, ale uvažuje len charakteristický rozmer častíc. Vzťah je viac empirického charakteru a poskytuje tak obvykle konzervatívnejšie výsledky.

$$\frac{\Delta p}{L} = 42,22 \cdot \frac{\mu^{0,15}}{\rho \cdot D_p^{1,15}} \cdot \left(\frac{G}{D_{ax}^2} \right)^{1,85} \quad (4.14)$$

Kde

D_{ax} [m] priemer sypaného lože.

Všetky veličiny sa počítajú rovnako ako pri metóde podľa Levy (4.1), je ale potrebné dosadzovať dynamickú viskozitu plynu v mPa.s.

Poslednou metódou určenia tlakových strát je **Ergunova rovnica** (4.15) [20], ktorá je spolu s Levyho metódou citlivá na medzerovitosť lože

$$\frac{\Delta p}{L} = 0,191 \cdot \frac{G \cdot \mu}{D_{ax}^2 \cdot \rho \cdot D_p^2} \cdot \frac{(1 - \varepsilon)^2}{\varepsilon^3} + 2,837 \cdot \frac{G^2}{D_{ax}^4 \cdot D_p} \cdot \frac{1 - \varepsilon}{\varepsilon^3} \quad (4.15)$$

4.1.1 VZOROVÝ VÝPOČET PODĽA LEVYHO

Vzorové výpočty sypaných loží budú vypočítané pre nosič guľičky 1. Použité konštanty sú zhrnuté v tab. 4.1.

Konštantá	Jednotka	Guličky 1	Guličky 2	Sedielka
Hustota vzduchu pre 22 °C	ρ [kg/m ³]	1,193	1,193	1,193
Medzerovitosť lože	ε [-]	0,44	0,44	0,74
Priemer častíc katalyzátoru	d_k [m]	0,003	0,009	0,0107
Dĺžka častíc katalyzátoru	l_k [m]	0,005	0,01	0,02
Prietokná plocha 0,155 x 0,155	S_{ax} [m ²]	0,024	0,024	0,024
Dynamická viskozita pre 22 °C	μ [Pa.s]	1,83E-05	1,83E-05	1,83E-05
Výška lože	L [m]	0,15	0,15	0,15
Priemer sypaného lože	D_{ax} [m]	0,155	0,155	0,155
Reálny prietok plynu	V_{real} [m ³ /h]	50,3	50,3	50,3

Tabuľka 4.1 Použité konštanty pre výpočet podľa Levyho

Ako prvé je potrebné vypočítať hustotu hmotnostného toku plynu podľa (4.a) a charakteristický rozmer častíc podľa (4.2)

$$G = \frac{\dot{V}_{real} \cdot \rho}{S_{ax}} = \frac{50,3 \cdot 1,193}{0,024} = 0,69 \text{ kg/m}^2\text{s} \quad (4.a)$$

$$D_p = \frac{3 \cdot d_k \cdot l_k}{d_k + 2 \cdot l_k} = \frac{3 \cdot 0,003 \cdot 0,005}{0,003 + 2 \cdot 0,005} = 0,00346 \text{ m} \quad (4.2)$$

Následne sa vypočíta povrch gule (4.3), reálny povrch častice (4.5) a tvarový faktor (4.6)

$$S_{gule} = \pi \cdot D_p^2 = \pi \cdot 0,00346^2 = 0,000038 \text{ m}^2 \quad (4.3)$$

$$S_{real} = \pi \cdot d_k \cdot \left(l_k + \frac{d_k}{2} \right) = \pi \cdot 0,003 \pi \cdot \left(0,005 + \frac{0,003}{2} \right) = 0,000061 \text{ m}^2 \quad (4.5)$$

$$\theta_s = \frac{S_{gule}}{S_{real}} = \frac{0,000038}{0,000061} = 0,614 \quad (4.6)$$

Na základe modifikovaného Reynoldsovho čísla (4.7) sa vyberie rovnica (4.8) a (4.12)

$$Re_m = \frac{D_p \cdot G}{\mu} = \frac{0,00346 \cdot 0,69}{1,83E^{-5}} = 131 \quad (4.7)$$

$$0 < Re_m < 170 \quad n = 0,3168 \cdot \ln(131) + 0,2216 = 1,766 \quad (4.8)$$

$$20 < Re_m < 600 \quad f_m = 17,271 \cdot 131^{-0,418} = 2,25 \quad (4.12)$$

Nakoniec je možné všetky konštanty dosadiť do rovnice (4.1) a vypočítať tlakovú stratu

$$|\Delta p| = \frac{f_m \cdot 2 \cdot G^2 \cdot (1 - \varepsilon)^{3-n}}{D_p \cdot \rho \cdot \theta_s^{3-n} \cdot \varepsilon^3} \cdot L = \frac{2,25 \cdot 2 \cdot 0,69^2 \cdot (1 - 0,44)^{3-1,766}}{0,00346 \cdot 1,193 \cdot 0,614^{3-1,766} \cdot 0,44^3} \cdot 0,15 = 823,43 \text{ Pa} \quad (4.1)$$

4.1.2 VZOROVÝ VÝPOČET PODĽA COLBURN-CHILTON

Použité konštanty viz. tab. 4.1. Vypočíta sa hmotnostný tok (4.b) a tlaková strata (4.14)

$$G = \frac{\dot{V}_{real} \cdot \rho}{3600} = \frac{50,3 \cdot 1,193}{3600} = 0,01666 \text{ kg/m} \quad (4.b)$$

$$\Delta p = 42,22 \cdot \frac{\mu^{0,15}}{\rho \cdot D_p^{1,15}} \cdot \left(\frac{G}{D_{ax}^2} \right)^{1,85} \cdot L = 42,22 \cdot \frac{0,0000183^{0,15}}{1,193 \cdot 0,00346^{1,15}} \cdot \left(\frac{0,0166}{0,155^2} \right)^{1,85} \cdot 0,15 = 355,125 \text{ Pa} \quad (4.14)$$

4.1.3 VZOROVÝ VÝPOČER PODĽA ERGUNOVEJ ROVNICE

Použité konštanty viz. tab. 4.1. Vypočíta sa tlaková strata (4.15)

$$\begin{aligned}\Delta p &= \left(0,191 \cdot \frac{G \cdot \mu}{D_{ax}^2 \cdot \rho \cdot D_p^2} \cdot \frac{(1 - \varepsilon)^2}{\varepsilon^3} + 2,837 \cdot \frac{G^2}{D_{ax}^4 \cdot D_p} \cdot \frac{1 - \varepsilon}{\varepsilon^3} \right) \cdot L \\ &= \left(0,191 \cdot \frac{0,0166 \cdot 0,0000183}{0,155^2 \cdot 1,193 \cdot 0,00346^2} \cdot \frac{(1 - 0,44)^2}{0,44^3} + 2,837 \cdot \right. \\ &\quad \left. \cdot \frac{0,0166^2}{0,155^4 \cdot 0,00346} \cdot \frac{1 - 0,44}{0,44^3} \right) \cdot 0,15 = 388,8 \text{ Pa}\end{aligned}\tag{4.15}$$

4.2 VÝPOČET TLAKOVEJ STRATY MONOLITICKÉHO NOSIČA

Pri výpočte tlakových strát monolitických nosičov typu honeycomb sa využíva CFD (computational fluid dynamics) simulácie prípadne analytické výpočty. Ďalej bude popísaný postup analytického výpočtu.

Pri prúdení média nosičom honeycomb sa vychádza z predpokladu, že objemový tok média je rozdelený do jednotlivých kanálikov nosiča a tlaková strata je v každom kanáliku rovnaká. To poskytuje možnosť zjednodušiť výpočet na úroveň tlakových strát v potrubí, a teda tlakovú stratu v jednom kanáliku nosiča honeycomb. Prvým krokom je určenie režimu prúdenia na základe Reynoldsovho čísla s porovnaním s kritickou hodnotou Reynoldsovho čísla pre kruhové potrubie $Re_{kr} = 2300$. Režim laminárneho prúdenia, kedy platí nerovnosť $Re < Re_{kr}$ charakterizujú trecie sily prevažujúce nad zotrvačnými silami, výmena hmoty sa deje len na základe molekulárnej difúzie, častice tekutiny sa pohybujú v navzájom súbežných vrstvách a nedochádza k nepravidelným zmenám miestnych rýchlostí. Prechodovú oblasť definuje $Re_{kr} < Re < 4\,000$. Nerovnosť $Re > 4\,000$ platí pre turbulentné prúdenie, kde zotrvačné sily prevažujú nad trecími. Výmena hmoty a hybnosti je intenzívna a rýchlosť sa mení nepravidelne [22]. Reynoldsovo číslo sa vypočíta podľa vzťahu (4.16) [19]

$$Re = \frac{\bar{c} \cdot d_h \cdot \rho}{\mu} = \frac{\bar{c} \cdot d_h}{\nu} \quad (4.16)$$

kde

\bar{c}	[m.s ⁻¹]	stredná prietoková rýchlosť tekutiny v potrubí,
ν	[m ² .s ⁻¹]	kinematická viskozita tekutiny,
d_h	[m]	hydraulický priemer potrubia
Re	[-]	Reynoldsovo číslo.

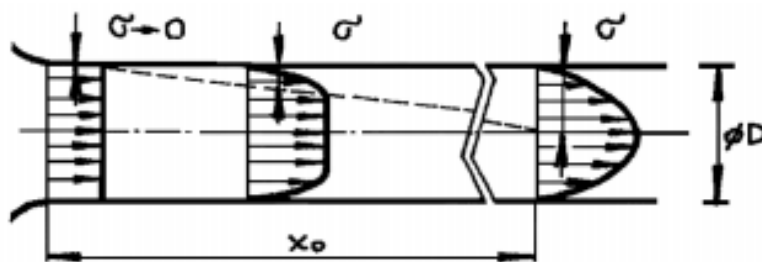
Hydraulický priemer potrubia je definovaný podľa (4.17) [19]

$$d_h = \frac{4 \cdot \text{zmáčaný prierez}}{\text{zmáčaný obvod}} \quad (4.17)$$

Pre laminárny ustálený režim prúdenia platí Hagen – Poiseuille rovnica (4.18)

$$\Delta p = \frac{32 \cdot \bar{c} \cdot l \cdot \mu}{d_h^2} \quad (4.18)$$

Daná rovnica neplatí pre krátke potrubia z dôvodu rozbehovej dráhy. Rozbehová dráha je úsek potrubia od vtoku až do bodu vytvorenia parabolického rýchlostného profilu (obr. 4.5). Na začiatku potrubia je v celom priereze rovnaká rýchlosť s výnimkou laminárnej podvrstvy. Vplyvom pevných stien je kvapalina v ich blízkosti brzdená. Postupne sa kvapalina urýchľuje až vznikne parabolický rýchlostný profil, prietok kvapaliny je rovnaký, a vzniká rovnováha medzi tlakovými a trecími silami..



Obrázok 4.5 Rozbehová dráha kvapaliny a rýchlostný profil [19]

Tento jav popisuje Hagenova oprava (4.19) [19]

$$\Delta p_{hag} = \frac{32 \cdot \bar{c} \cdot l \cdot \mu}{d_h^2} + 1,1 \cdot \rho \cdot \bar{c}^2 \quad (4.19)$$

Kde

l [m] dĺžka potrubia.

Následne je k Hagenovej oprave potrebné pripočítať miestne odpory, čo sú časti potrubia, ktoré spôsobujú stratu energie prúdiacej tekutiny. Pre jeden kanálik honeycomb sa uvažuje druh miestneho odporu ostrý vtok do kanáliku a výtok z kanáliku o hodnotách ξ 0,5 a 1 [19]. Tlaková strata pri prietoku miestnym odporom je daná vzťahom (4.20) a následne celá tlaková strata (4.21) [19]

$$\Delta p_{\xi} = \xi \cdot \frac{\bar{c}^2 \cdot \rho}{2} \quad (4.20)$$

$$\Delta p_{celk} = \Delta p_{hag} + \Delta p_{\xi} \quad (4.21)$$

Kde

ξ [-] súčiniteľ miestneho odporu, kde pre odpory radené za sebou platí (4.22)

$$\xi = \sum \xi_i \quad (4.22)$$

Výpočet tlakovej straty pri turbulentnom prúdení nebude opísaný z dôvodu limitácie laboratórnymi podmienkami a teda nedosiahnutím turbulentného režimu prúdenia.

4.2.1 VZOROVÝ VÝPOČET PODĽA HAGEN-POISEUILLE

Vzorové výpočty pre HoneyComb budú vypočítané pre nosič HoneyComb 3 BASF. Použité konštanty sú zhrnuté v tab. 4.2.

Konštantá	Jednotka	HC 3 BASF	HC 2 CERAM	HC 1 CERAM
Hustota vzduchu pre 22 °C	ρ [kg/m ³]	1,193	1,193	1,193
Kinematická viskozita pre 22 °C	ν [m ² /s]	0,003	0,003	0,003
Veľkosť strany kanálika	a [m]	3,16E-3	3,16E-3	4,20E-03
Rýchlosť vzduchu v 1 kanáliku	c [m/s]	0,947	0,917	0,954
Počet kanálikov v usporiadaní	R [-]	1 600	1 600	900
Dynamická viskozita pre 22 °C	μ [Pa.s]	1,83E-05	1,83E-05	1,83E-05
Dĺžka kanálika	l [m]	0,3	0,15	0,15
Súčiniteľ miestneho odporu	ξ [m]	1,5	1,5	1,5
Reálny prietok plynu	V_{real} [m ³ /h]	54,49	54,12	54,49

Tabuľka 4.2 Použité konštanty pre výpočet podľa Hagen-Poiseuille

Najskôr sa vypočíta hydraulický priemer podľa (4.17), potom rýchlosť vzduchu v 1 kanáliku (4.c) a následne Reynoldsovo číslo (4.16)

$$d_h = \frac{4 \cdot \text{zmáčaný prierez}}{\text{zmáčaný obvod}} = \frac{4 \cdot a \cdot a}{4 \cdot a} = \frac{4 \cdot 3,16E^{-3} \cdot 3,16E^{-3}}{4 \cdot 3,16E^{-3}} = 3,16E^{-3} \text{ m} \quad (4.17)$$

$$\bar{c} = \frac{\frac{\dot{V}_{real}}{3600}}{\frac{R}{a \cdot a}} = \frac{\frac{54,49}{3600}}{\frac{1600}{3,16E^{-3} \cdot 3,16E^{-3}}} = 0,947 \text{ m/s} \quad (4.c)$$

$$Re = \frac{\bar{c} \cdot d_h \cdot \rho}{\mu} = \frac{\bar{c} \cdot d_h}{\nu} = \frac{0,947 \cdot 3,16E^{-3}}{0,003} = 194,94 \quad (4.16)$$

Z Reynoldsovho čísla vyplýva laminárne prúdenie a je tak možné použiť rovnicu Hagen-Poiseuille (4.18)

$$\Delta p = \frac{32 \cdot \bar{c} \cdot l \cdot \mu}{d_h^2} = \frac{32 \cdot 0,947 \cdot 0,3 \cdot 1,83E^{-5}}{0,0316^2} = 16,68 \text{ Pa} \quad (4.18)$$

Pre krátke potrubia je nutné použiť Hagenovu opravu (4.19)

$$\Delta p_{hag} = \Delta p + 1,1 \cdot \rho \cdot \bar{c}^2 = \Delta p + 1,1 \cdot 1,193 \cdot 0,947^2 = 17,86 \text{ Pa} \quad (4.19)$$

A k Hagenovej oprave sa pripočítajú miestne odpory podľa (4.20) a výsledná tlaková strata podľa (4.21)

$$\Delta p_{\xi} = \xi \cdot \frac{\bar{c}^2 \cdot \rho}{2} = 1,5 \cdot \frac{0,947^2 \cdot 1,193}{2} = 0,8 \text{ Pa} \quad (4.20)$$

$$\Delta p_{celk} = \Delta p_{hag} + \Delta p_{\xi} = 17,86 + 0,8 = 18,66 \text{ Pa} \quad (4.21)$$

4.3 VÝPOČET TLAKOVEJ STRATY PORÉZNEJ PENY VUKOPOR

Výpočet tlakových strát poréznej peny Vukopor je obzvlášť komplikovaný z dôvodu ťažko opísateľného vnútorného tvaru a veľkostí buniek peny. Danými metódami výpočtu je možné sa priblížiť reálnym tlakovým stratám, no smerodajné bude experimentálne hľadisko.

4.3.1 TLAKOVÁ STRATA PORÉZNEJ PREPÁŽKY

Pre výpočet tlakovej straty filtrov Vukopor typu A sa vychádza z predpokladu, že sa jedná o poréznu prepážku, teda o objem vyplnený časticami partikulárnej látky. Pre jej možnosť použitia ako nosič katalyzátoru je potrebné dosiahnuť požiadavky platné aj pre poréznu prepážku, a to maximálny povrch častíc v danom objeme a nízky odpor pri prietoku a rovnomerné rozdelenie tekutiny v celom priereze. Ďalším predpokladom je jednofázový tok poréznu prepážkou, kedy cez ňu preteká len homogénna tekutina [23]. Pre jednofázový tok tekutiny poréznu prepážkou platí vzťah (4.23) [19]

$$\Delta p = \frac{\lambda_{pp}}{8} \cdot \alpha \cdot h \cdot c^2 \cdot \frac{1 - \varepsilon}{\varepsilon^3} \cdot a_r \cdot \rho \cdot r_h \quad (4.23)$$

kde

a	[m ⁻¹]	špecifický povrch,
a _r	[m ⁻¹]	relatívny špecifický povrch.
ρ	[kg/m ³]	hustota partikulárnej látky,
λ _{pp}	[-]	súčiniteľ odporu,
c	[m/s]	rýchlosť tekutiny poréznu prepážkou,
h	[m]	výška vrstvy,
r _h	[m]	ekvivalentný hydraulický polomer kanáliku,
α	[-]	súčiniteľ kľukatosti pórov,
d _p	[m]	priemer pórov,
Re _{pp}	[-]	Reynoldsovo číslo.

Súčiniteľ kľukatosti α predstavuje dĺžku kapilárneho kanáliku oproti výške vrstvy h. Hodnota súčiniteľa sa stanovuje experimentálne, keďže zahŕňa aj ekvivalentnú dĺžku, ktorá nahrádza ohyby, rozšírenia a zúženia kanálikov. Jeho hodnota je pre náhodné usporiadanie izometrických častíc α ∈ <1,2; 1,4>. Ďalší charakteristický rozmer kanálikov je hydraulický polomer (4.24) a relatívny špecifický povrch (4.25) [19]

$$r_h = \frac{1}{6} \cdot d_p \cdot \frac{\varepsilon}{1 - \varepsilon} \quad (4.24)$$

$$\alpha = (1 - \varepsilon) \cdot a_r \quad (4.25)$$

Ďalej je potrebné definovať súčiniteľ odporu λ_{pp} [-], ktorý má podobný fyzikálny význam ako u prúdení a je teda rovnako závislý na hodnote Reynoldsovho čísla (4.26)

$$Re_{pp} = \frac{4 \cdot c \cdot \rho}{a \cdot \mu} \quad (4.26)$$

Súčiniteľ odporu λ_{pp} sa vypočíta v závislosti od použitej výplne. Pre voľne sypanú vrstvu monodisperzných častíc, čo odpovedá štruktúre Vukopor filtru platia vzťahy (4.27) a (4.28) [19]

$$\lambda_{pp} = \frac{140}{Re_{pp}} \quad pre \ Re_{pp} \leq 40 \quad (4.27)$$

$$\lambda_{pp} = \frac{16}{Re_{pp}^{0,2}} \quad pre \ Re_{pp} > 40 \quad (4.28)$$

4.3.2 TLAKOVÁ STRATA PODĽA ERGUNA

Tak ako pre výpočet tlakových strát sypaných loží sa využíva Ergunova rovnica upravená na tvar s využitím priemeru pórov Vukoporu (4.29) [24]

$$\frac{\Delta p}{H} = 150 \cdot \frac{c \cdot \mu}{d_p^2} \cdot \frac{(1 - \varepsilon)^2}{\varepsilon^3} + 1,75 \cdot \frac{\rho \cdot c^2}{d_p} \cdot \frac{(1 - \varepsilon)}{\varepsilon^3} \quad (4.29)$$

4.3.3 VZOROVÝ VÝPOČET POMOCOU PORÉZNEJ PREPÁŽKY

Vzorové výpočty pre keramickú penu budú vypočítané pre nosič VUKOPOR 20 ppi. Použité konštanty sú zhrnuté v tab. 4.3.

Konštanta	Jednotka	VUK 20 ppi	VUK 40 ppi	VUK 60 ppi a)	VUK 60 ppi b)
Hustota keramiky	ρ [kg/m ³]	2 350	2 350	2 350	2 350
Súčiniteľ kl'ukatosti	α [-]	1,2	1,2	2,5	2,5
Priemer pórov	d_p [m]	0,015	0,0008	0,0009	0,0009
Medzerovitost' peny	ε [-]	0,709	0,815	0,888	0,888
Dynamická viskozita pre 22 °C	μ [Pa.s]	1,83E-05	1,83E-05	1,83E-05	1,83E-05
Výška peny	h [m]	0,096	0,096	0,096	0,048
Prietočná plocha	S_{ax} [m ²]	0,0222	0,0222	0,0222	0,0222
Reálny prietok plynu	V_{real} [m ³ /h]	54,34	54,34	53	53

Tabuľka 4.3 Použité konštanty pre výpočet podľa poréznej prepážky

Najprv je potrebné vyčíslit' rýchlosť prúdenia vzduchu v pene podľa (4.e)

$$\bar{c} = \frac{\dot{V}_{real}}{S_{ax}} = \frac{54,34}{3600} = \frac{54,34}{0,0222} = 0,679 \text{ m/s} \quad (4.e)$$

Vypočíta sa charakteristický rozmer kanálikov hydraulický polomer (4.24) a relatívny špecifický povrch (4.25)

$$r_h = \frac{1}{6} \cdot d_p \cdot \frac{\varepsilon}{1 - \varepsilon} = \frac{1}{6} \cdot 0,015 \cdot \frac{0,709}{1 - 0,709} = 0,000609 \text{ m} \quad (4.24)$$

$$a_r = \frac{a}{(1 - \varepsilon)} = \frac{1164}{(1 - 0,709)} = 4000 \quad (4.25)$$

Ďalej sa definuje súčiniteľ odporu (4.28) pomocou Reynoldsova čísla (4.26)

$$Re_{pp} = \frac{4 \cdot c \cdot \rho}{a \cdot \mu} = \frac{4 \cdot 0,679 \cdot 2350}{4000 \cdot 1,85E^{-5}} = 152 \quad (4.26)$$

$$\lambda_{pp} = \frac{16}{Re_{pp}^{0,2}} = \frac{16}{152^{0,2}} = 5,85 \quad pre \ Re_{pp} > 40 \quad (4.28)$$

Po určení všetkých potrebných konštánt sa vypočíta tlaková strata (4.23)

$$\begin{aligned} \Delta p &= \frac{\lambda_{pp}}{8} \cdot \alpha \cdot h \cdot c^2 \cdot \frac{1 - \varepsilon}{\varepsilon^3} \cdot a_r \cdot \rho \cdot r_h \\ &= \frac{5,85}{8} \cdot 1,2 \cdot 0,096 \cdot 0,679^2 \cdot \frac{1 - 0,709}{0,709^3} \cdot 4000 \cdot 2350 \cdot 0,000609 \\ &= 174,69 \text{ Pa} \end{aligned} \quad (4.23)$$

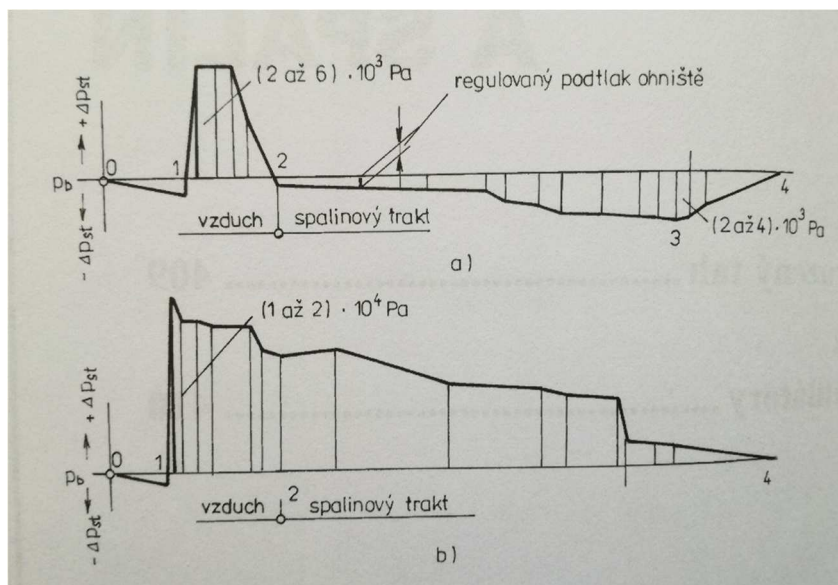
4.3.4 VZOROVÝ VÝPOČET POMOCOU ERGUNOVEJ ROVNICE

Použité konštanty viz tab. 4.3 so zmenou hustoty keramiky na hustotu vzduchu 1,192 kg.m⁻³. Ergunovou rovnicou (4.29) sa vypočíta tlaková strata

$$\begin{aligned} \Delta p &= \left(150 \cdot \frac{c \cdot \mu}{d_p^2} \cdot \frac{(1 - \varepsilon)^2}{\varepsilon^3} + 1,75 \cdot \frac{\rho \cdot c^2}{d_p} \cdot \frac{(1 - \varepsilon)}{\varepsilon^3} \right) \cdot h = \left(150 \cdot \frac{0,679 \cdot 1,85E^{-5}}{0,015^2} \cdot \frac{(1 - 0,709)^2}{0,709^3} + 1,75 \cdot \right. \\ &\quad \left. \frac{1,192 \cdot 0,679^2}{0,015} \cdot \frac{(1 - 0,709)}{0,709^3} \right) \cdot 0,096 = 66,44 \text{ Pa} \end{aligned} \quad (4.29)$$

4.4 VENTILÁTORY

V spaľovni odpadov je nutné dopravovať dostatočné množstvo spaľovacieho vzduchu do horáku a odvieť spaliny tak, aby neznečisťovali pracovné prostredie a okolie elektrárne. Pre tento účel, ako aj k prekonaniu aerodynamických odporov celého zariadenia sa používajú vzduchové a spalinové ventilátory. Spaľovne môžu byť navrhnuté s podtlakovým alebo pretlakovým ohniskom. Priebeh tlaku je zobrazený na obr. 4.7.



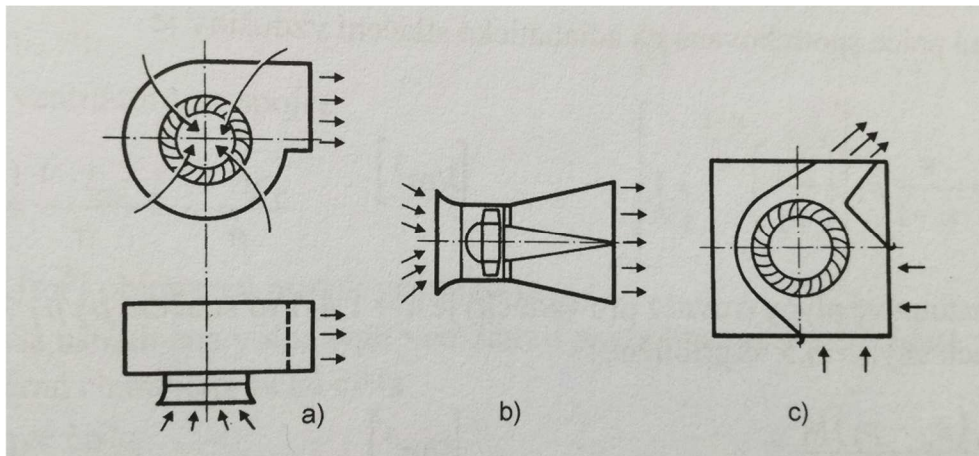
Obrázok 4.7: Priebeh tlaku vo vzducho-spalinovom trakte:
a) podtlakové ohnisko, b) pretlakové ohnisko [15]

V prípade a) kotol s podtlakovým ohniskom sa z dôvodu fluktuácie tlaku v ohnisku v mieste odchodu spalín z ohniska (2) udržiava konštantný podtlak 20 až 400 Pa, aby nenastal pretlak a spaliny nevnikli naspäť do kotolne. Príliš veľký podtlak má ale za následok prisávanie falošného vzduchu v ohnisku, čo zhoršuje účinnosť kotla. V prípade b) kotlov s pretlakovým ohniskom sa používajú len vzduchové ventilátory, ktoré vytvárajú dostatočne veľký pretlak pre dopravu vzduchu aj spalín od kotla až po komín. V tomto prípade nie sú potrebné spalinové ventilátory, ale kotol musí byť konštruovaný s plynotesnými stenami aby sa zabránilo vnikaniu spalín do kotolne [15].

U spaľovní odpadov sa využívajú len podtlakové ohniská s inštalovanými spalinovými ventilátormi z dôvodu veľkých tlakových strát systému čistenia spalín. Spalinové ventilátory sú rotačné stroje, ktoré vyvíjajú pretlak potrebný pre dopravu spalín. U veľkých spaľovní môžu ventilátory vyvíjať príkon aj niekoľko MW, z tohto dôvodu je dôležitá správna voľba typu a spôsobu regulácie ventilátoru. Ventilátory sa delia podľa [15]:

- celkového dopravného pretlaku:
 - nízkotlakové – do 1 kPa
 - stredotlakové – 1 až 3 kPa
 - vysokotlakové – 3 až 10 kPa
- pre vyššie dopravné pretlaky sa používajú dmychadlá a kompresory

- smeru prúdenia vzdušniny ventilátorom obr. 4.8:
- a) radiálne
 - b) axiálne
 - c) s priečnym prúdením

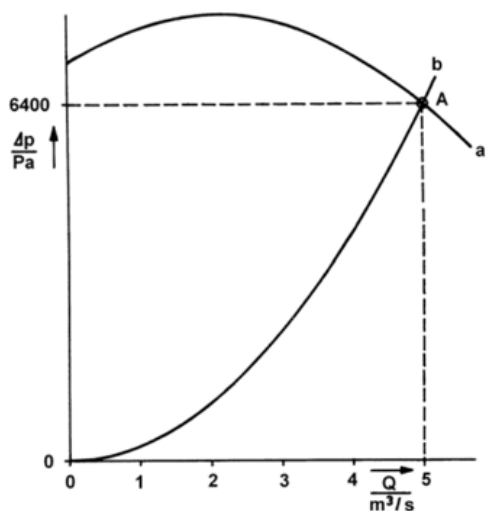


Obrázok 4.8: Konštrukčné riešenia ventilátoru: a) radiálne, b) axiálne, c) s priečnym prúdením [15]

Regulácia ventilátorov má za účel prispôbiť veľkosť prietoku vzduchu požadovanému výkonu. Pri danom prietoku spalín musí ventilátor vytvoriť dostatočný pretlak k prekonaniu aerodynamických strát v celom systéme. Regulácia má za účel minimalizovať príkon ventilátoru pri danom prietoku. Spôsoby regulácie sú nasledovné [15]:

- regulácia škrtením na výtlaku
- aerodynamická regulácia
- natáčanie rotorových lopatiek

Ventilátory vyžadujú nízku hlučnosť a tomuto kritériu najlepšie vyhovujú odstredivé ventilátory, ktoré majú pri rovnakom Δp menšiu obvodovú rýchlosť kola. Účinnosť ventilátoru závisí na veľkosti – najmenšie majú účinnosť 30 – 40 %, veľké radiálne 60 – 80 % a veľké axiálne dosahujú okolo 90 %. Závislosť tlakovej diferencie Δp na prietoku Q vyjadruje ventilátorová charakteristika (a) obr. 4.9, ktorá znázorňuje zvýšenie tlaku ventilátorom Δp , odporová charakteristika systému (b) znázorňuje tlakový úbytok Δp v ňom. V oboch prípadoch v závislosti na dopravovanom množstve Q . Priesečník A oboch charakteristík, neovplyvnenou žiadnou reguláciou, je prirodzeným pracovným bodom [28].



Obrázok 4.9 Ventilátorová a odporová charakteristika [28]

Návrh spalínového ventilátoru závisí od reálneho prietoku spalín daný vzťahom (4.30)

$$Q = \frac{T_0 + T_1}{T_0} \cdot \frac{p_0}{p_1} \cdot V_0 \quad (4.30)$$

Kde

Q	[m ³ /h]	reálny prietok spalín,
T ₀	[°C]	teplota okolia,
T ₁	[°C]	teplota spalín,
p ₀	[kPa]	tlak okolia,
p ₁	[kPa]	tlak spalín,
V ₀	[Nm ³ /h]	množstvo vlhkých spalín.

Ďalej sa definuje reálna hustota spalín (4.31)

$$\rho_{real} = \frac{\rho_{vz}}{\frac{T_0 + T_1}{T_0} \cdot \frac{p_0}{p_1}} \quad (4.31)$$

Kde

ρ _{vz}	[kg/m ³]	hustota vzduchu,
ρ _{real}	[kg/m ³]	reálna hustota spalín,

Celková tlaková diferencia sa spočíta podľa (4.32)

$$\Delta p_{celk1} = \Delta p_{celk} \cdot \frac{\rho_{real}}{\rho_{vz}} \quad (4.32)$$

Kde

Δp _{celk1}	[kPa]	celková tlaková diferencia,
Δp _{celk}	[kPa]	tlaková diferencia sania a výtlaku ventilátora.

Na základe danej účinnosti η ventilátora sa vypočíta príkon ventilátoru podľa (4.33)

$$P = \frac{\Delta p_{celk} \cdot Q}{\eta} \quad (4.33)$$

Ako je z rovnice (4) zrejmé, príkon, ako aj celkové ekonomické hľadisko závisí od tlakovej straty, čím nižšia bude tlaková strata tým budú finančné úspory väčšie.

5 EXPERIMENTÁLNE ZARIADENIE INTEQ II

Jednotka INTEQ II je nástupcom technologického zariadenia INTEQ I navrhnutého a skonštruovaného na ústave procesného inžinierstva na fakulte strojného inžinierstva VUT v Brne. Konštrukčne bol INTEQ I navrhnutý pre testovanie účinnosti filtračných rukávcoz REMEDIA od americkej spoločnosti GORE. Bol prispôsobený na vykonávanie viacerých jednotkových operácií, a to zachytávanie popolčeka, odstraňovanie kyslých zložiek, rozklad NO_x, dioxinov a furanov zo spalín spaľovni komunálneho a nebezpečného odpadu. Obsahoval 15 látkových filtrov REMEDIA s celkovou filtračnou plochou 17,9 m² pri filtračnej teplote 250 °C a prietoku spalín 1 000 m³/h. Jednotka INTEQ I bola pri testoch zameraných na znižovanie obsahu škodlivín NO_x v spaľovni SAKO Brno, a.s. silne poškodená a neschopná ďalšej prevádzky. Preto sa rozhodlo o návrhu novej jednotky INTEQ II na základe prevádzkových poznatkov získaných z INTEQ I (obr. 5.1) [29].



Obrázok 5.1 Filtračné zariadenie INTEQ I [29]

5.1 POPIS TECHNOLOGIE INTEQ II

Hlavnou požiadavkou na návrh novej jednotky bolo zvýšenie mobility a variability a tak vylepšiť predchádzajúcu verziu I. Na základe týchto požiadaviek bola zostrojená verzia II, ktorá sa ale vzdďaľuje od parametrov jednotiek v bežnej priemyselnej praxi.

Hlavné požiadavky novej verzie II boli:

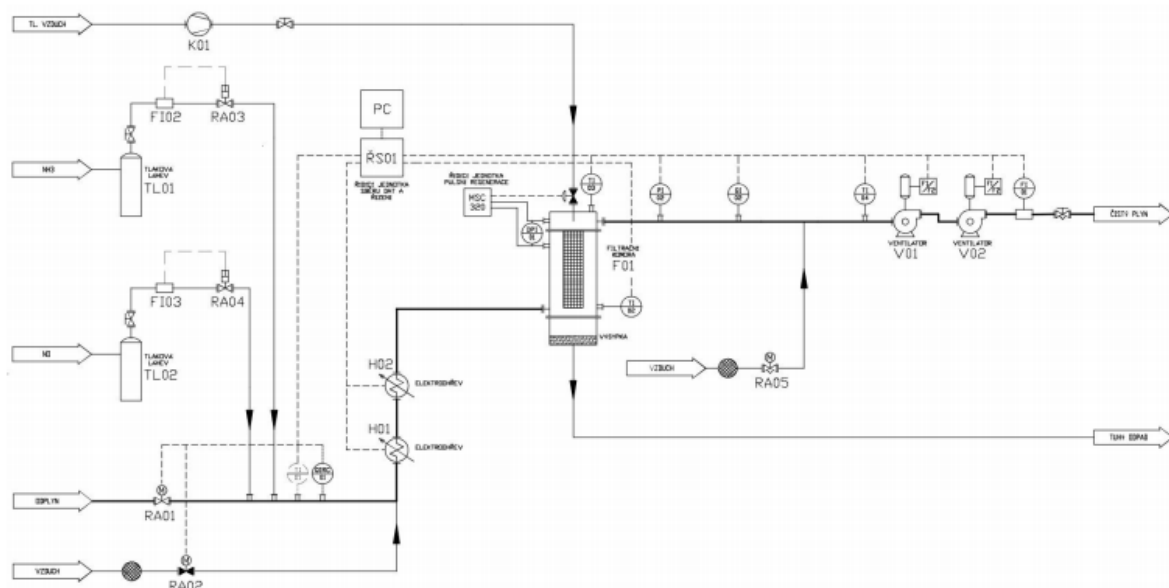
- Kompaktnosť jednotky: návrh celej technológie vstavanej v oceľovom ráme o kompaktných rozmeroch s možnosťou jednoduchkej manipulácie a transportu.
- Použitie odolných materiálov u dôležitých funkčných častí: zabránenie vzniku silne korozívnych kyselín a jej solí v miestach styku spalín s funkčnými časťami a kondenzácií par z dôvodu častých odstávok jednotky.
- Autonómne dávkovanie amoniaku v zvolenom molárnom pomere: na rozdiel od manuálneho dávkovania redukčného činidla vo verzii I, autonómne dávkovanie amoniaku a prevencia pred tvorbou NH_3 a nebezpečných zlúčenín.
- Možnosť testovania látkových a keramických filtrov: jednotka disponuje spoločným potrubným vedením a armatúrami vhodnými pre dve rôzne filtračné komory, jedna pre textilné filtre a druhá pre keramické filtre.
- Prevádzková teplota 220 °C a viac: možnosť testovať keramické filtračné materiály a výhodnosť ich použitia pri teplotách nad 300 °C [29].

Z daných požiadaviek vzniklo zariadenie INTEQ II na obr. 5.2.



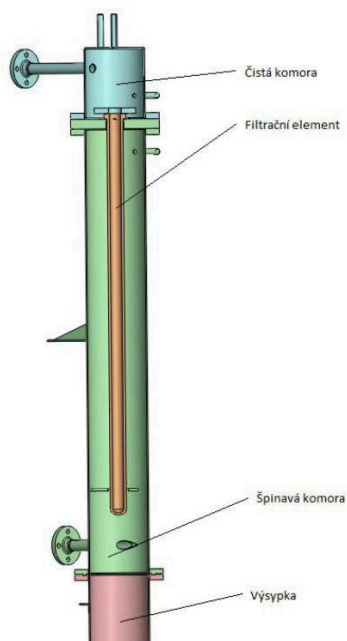
Obrázok 5.2 Experimentálne zariadenie INTEQ II

Na obr. 5.3 je znázornené technologické schéma INTEQ II s názorným radením jednotlivých častí vybavenia, potrubia, prvkov meraní a regulácie.



Obrázok 5.3 Technologické schéma INTEQ II [29]

Procesný prúd Spaliny-čistý plyn tvoria hlavný prúd technológie. Odporový termočlánok TI01 meria teplotu spalín na vstupe do technológie. Pred ohrievačmi je umiestnený prívod polutantov NO_x a redukčného činidla NH_3 . Elektroohrev H01 a H02 zvyšuje teplotu spalín v prípade potreby. Takto ohriate spaliny na teplotu vhodnú pre filtráciu a redukciu NO_x vstupujú zmiešané s polutantmi a redukčným činidlom do filtračnej komory (obr. 5.4) do filtra F01. Filter F01 tvorí hlavnú technologickú časť celej jednotky INTEQ II. Namiesto tohto filtra bola nainštalovaná filtračná komora pre použitie keramických filtračných materiálov. Po vstupe znečisteného plynu do filtračnej komory sa spaliny zbavia znečisťujúcich látok a opúšťajú komoru čistou časťou hlavy komory (obr. 5.5). Látky zachytené na keramickom filtri z časti ostanú zachytené na filtri a z časti spadnú vplyvom gravitácie do zásobníku výsypky komory. Zachytená vrstva na filtri postupne narastá, čím sa zvyšuje aj tlaková strata, čo má za následok zvýšenie energetických nárokov na dopravu média. Znamená to, že pri náraste tlakovej straty klesá prietok spalín technológiou čistenia. Znížený prietok sa kompenzuje zvýšením výkonu ventilátorov V01 a V01 (obr. 5.6) čím dôjde k zvýšeniu ich príkonu a teda vyššie prevádzkové náklady [29].



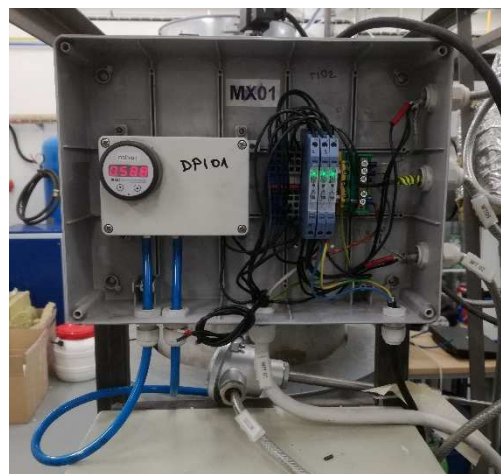
Obrázok 5.4 Filtračná komora [29]



Obrázok 5.5 Čistá časť hlavy komory



Obrázok 5.6 Ventilátory V01 a V02



Obrázok 5.7 Diferenčný tlakomer DPI01

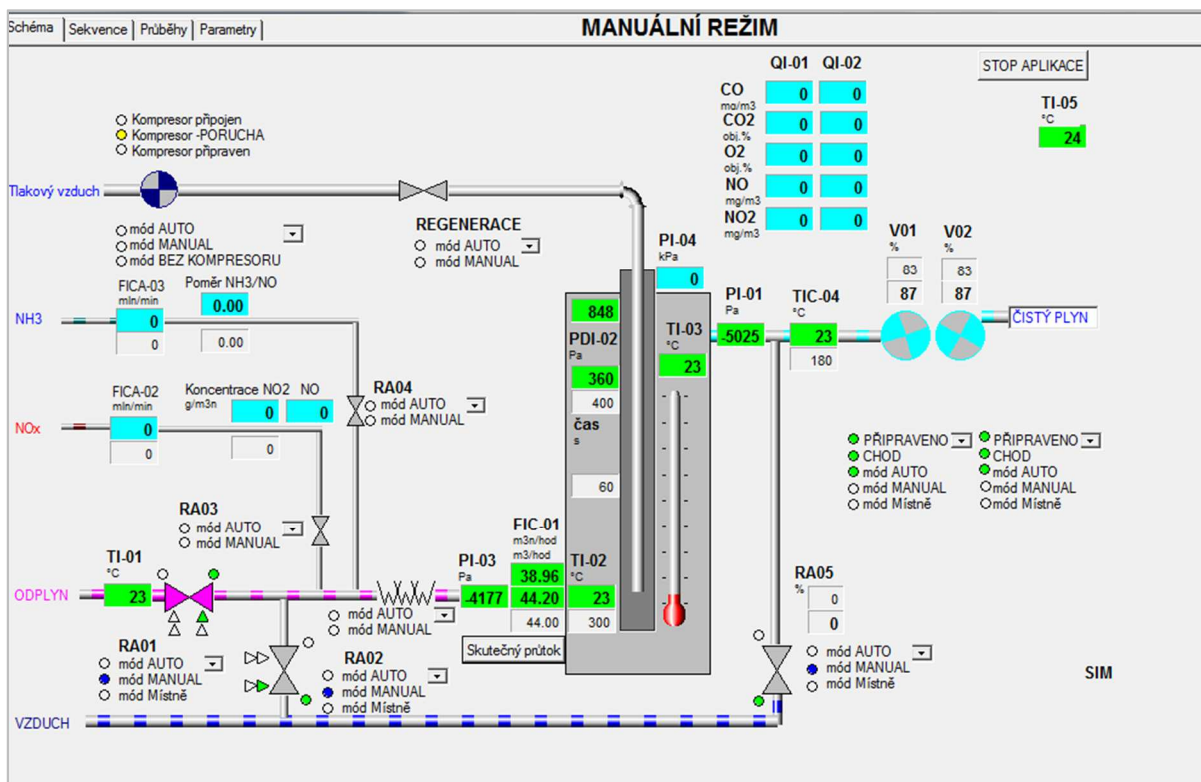
Pre zamedzenie tvorby nánosov na povrchu filtračného elementu slúži systém regenerácie filtra, ktorý funguje na princípe spätného prefúknutia filtra čistým vzduchom. Kompresor K01 dodáva tlakový vzduch systému regenerácie. Počet prefúknutí riadi regeneračná automatika MSC 320.1, ktorá pracuje na základe tlakovej straty alebo podľa daného časového intervalu. Tlakovú stratu filtračného elementu meria diferenčné tlakové čidlo DPI01. Maximálna teplota, ktorú prijímú ventilátory V01 a V02 je 180 °C. Teplota filtrácie sa však pohybuje okolo 450 °C a tak je potrebné riediť vyčistený plyn pred vstupom do ventilátorov atmosférickým vzduchom pomocou regulačnej armatúry RA05 [29].

5.2 VYBAVENIE ZARIADENIA INTEQ II

Experimentálne zariadenie INTEQ II je zložené nasledujúcimi zariadeniami:

- **Ventilátory V01 a V02** – dva identické sériovo radené stredotlaké ventilátory HRD 1 TFU – 105/0,55 tvoria sústavu transportných ventilátorov. Maximálna pracovná teplota je 180 °C, príkon každého ventilátoru je 0,55 kW a otáčky sú riadené frekvenčnými meničmi.
- **Jednouúčelová jednotka spínania solenoidových ventilov MCS 320.1** – Jednotka zaist'uje spustenie regenerácie filtra pri uplynutí daného časového intervalu alebo dosiahnutí definovanej limity tlakovej straty alebo prijatia signálu k spusteniu z riadiacej aplikácie.
- **Riadiaci systém jednotky** – INTEQ II je vybavený riadiacou jednotkou ADiS
- **Armatúry:** RA01 a RA02 sú uzatváracie ventily riadené elektropohonom s trojbodovým riadením s bezpečnostnou funkciou s dobou behu armatúry RA01 22,5 sekundy a 22,5 sekundy u armatúry RA02. Armatúry RA03 a RA05 sú solenoidové ventily na dávkovanie redukčného činiteľa alebo polutantov riadené užívateľsky daných dávkovacích intervalov. Regulačný ventil RA05 je taktiež vybavený elektropohonom s trojbodovým riadením a behom 56 sekund.
- **Prietokomery** – FI01 je hmotnostný prietokomer, ktorý meria prietok pred reaktorom (komorou). Vo výstupnej časti spalínovodu je inštalovaná clona a diferenčný tlakomer vyhodnocuje prietok spalín potrubím na základe rozdielu statického a dynamického tlaku v spalínovode. FI02 a FI03 sú hmotnostné prietokomery vybavené funkciou PID regulátorov, ktoré regulujú prietok polutantov alebo redukčného činiteľa na danú hodnotu.
- **Tlakomery** – DPI01 diferenčný tlakomer, ktorý meria veľmi malé tlaky.
- **Meranie teploty** – TI01 – TI04 o rozsahu -60 – 600 °C sú odporové termočlánky Pt100. Odchýlka pri izbovej teplote 22 °C je okolo 40 °C, no v oblasti teplôt katalýzy teplomery zaznamenávajú platné hodnoty.
- **Ohrievacie telesá** – H01 a H02 typu RCF 1100 R sa využívajú na ohriatie spalín na teplotu filtrácie. Sú tesne navinuté na prírodné potrubie spalín do technológie a zaizolované. Teplo je prenášané cez stenu potrubia, čím je zabránené zanášanie ohrievacích telies
- **Analýzátor spalín** – možnosť zapojiť naodberových miestach alebo na vstupoch riadiaceho systému jednotky analyzátor Easyline EL3000 [29].

Na obr. 5.8 je znázornená riadiaca aplikácia ITEQII ako aj všetko spomenuté ovládateľné vybavenie jednotky INTEQII.



Obrázok 5.8 Riadiaca aplikácia ITEQII

5.3 ZÁKLADNÁ VÝPOČTOVÁ CHARAKTERISTIKA GHSV

Priestorová rýchlosť je pojem používaný u katalyzátorov pre popis doby trvania prechodu plynu z vstupu do katalyzátoru až po jeho výstup a tak umožniť efektívne porovnávanie katalyzátorov medzi sebou. V praxi sa teda u katalyzátorov pre rýchlosť prúdenia využíva tzv. GHSV, čo znamená **Gas Hourly Space Velocity**, teda priestorová rýchlosť plynu za hodinu. S takýmto označením sa pracuje pohodlnejšie, pretože je rýchlosť väčšinou vo väčších jednotkách až stovkách (100 h^{-1}) ako naopak u znázornení rýchlosti v jednotkách m/s, ktoré sú často v jednotkách desatinných miest (0,033 m/s). GHSV sa teda udávajú napríklad požiadavky na minimálnu rýchlosť prúdenia alebo výsledky testov rýchlosti prúdenia. Výpočet vychádza zo známeho prietoku plynu za normálnych podmienok cez známy objem katalyzátora podľa rovnice (5.1) [30]

$$GHSV = \frac{\dot{Q}}{V_{kat}} \quad (5.1)$$

Kde

\dot{Q} [m^3/h]

V_{kat} [m^3]

GHSV [h^{-1}]

prietok plynu za normálnych podmienok,
objem katalyzátora.

priestorová rýchlosť plynu za hodinu.

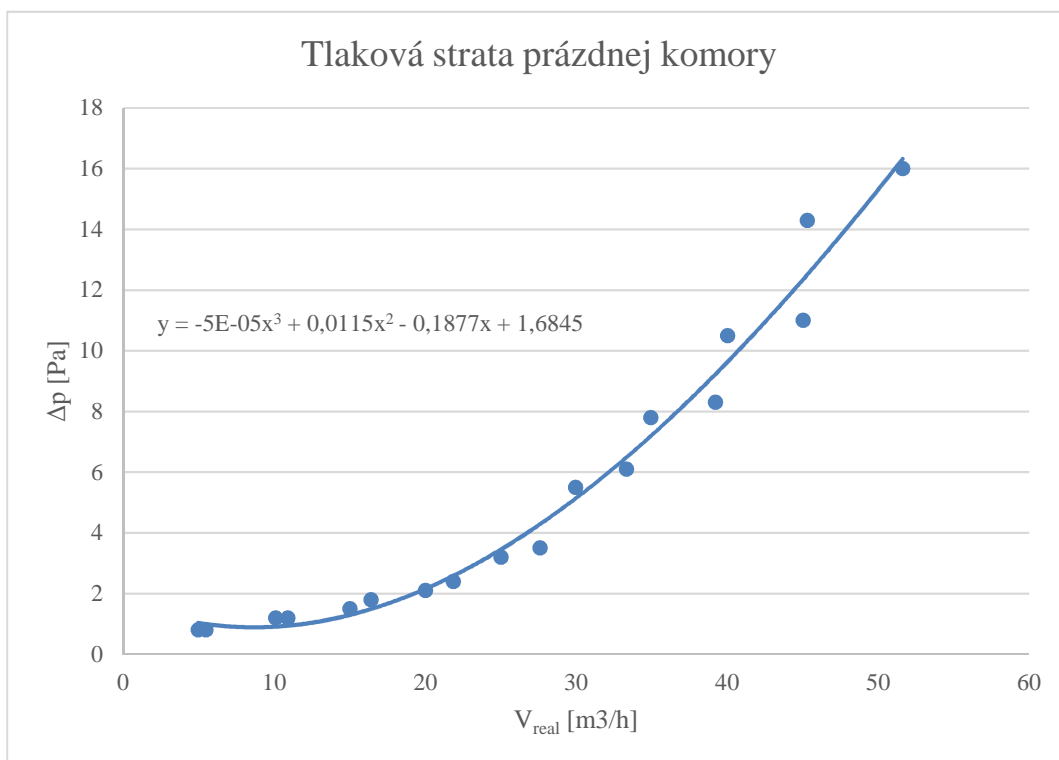
6 PRAKTICKÁ ČASŤ

Samotná praktická časť obsahuje jednotlivé merania tlakových strát daných nosičov katalyzátorov, a to sypané lože typu guľičky a sedielka, voštinový nosič HoneyComb a keramická pena VUKOPOR. Meranie prebiehalo na spomenutom zariadení INTEQ II v laboratórií NETME centra ústavu Procesného inžinierstva VUT. Nosiče katalyzátorov boli vložené do hlavy filtračnej kolóny (obr. 6.1), upevnené a utesnené. Tlaková strata bola meraná tlakomerom DPI01, ktorý meral tlak pred a za katalyzátorom v jednotkách mbar. Ako testovací plyn bol použitý obyčajný vzduch o teplote okolia 22 °C. Pomocou ovládacej aplikácie ITEQII bol otvorený len ventil prívodu odplynu (v tomto prípade vzduchu), ostatné ventily boli zavreté. Ďalej bol nastavovaný výkon dvojice ventilátorov V01 a V02 od spodnej možnej nastaviteľnej hodnoty prietoku 4 mN³/h, vždy zväčšený o hodnotu 1 mN³/h až do limitnej hodnoty danej výkonom ventilátorov (45-55 mN³/h, závislej od nosiča). Hodnoty prietoku ako aj tlakovej straty boli zaznamenávané v programe MS Excel.



*Obrázok 6.1 Hlava filtračnej komory,
kde boli vložené jednotlivé nosiče*

Pre správne výsledky tlakových strát je nutné pred samotným meraním nosičov zmerať tlakovú stratu prázdnej filtračnej komory (bez nosičov katalyzátora) pre jednotlivé hodnoty prietoku vzduchu. Na základe hodnôt tlakovej straty prázdnej komory bol zostrojený graf reálneho prietoku v závislosti na tlakovej strate (obr.6.2) pomocou polynomickej trendovej spojnice 3. stupňa. Rovnica krivky (6.1) slúži na dopočítanie tlakovej straty prázdnej komory pre konkrétne hodnoty prietoku u jednotlivých nosičov. Následne je potrebné hodnoty tlakovej straty prázdnej komory odčítať od hodnôt tlakových strát nosičov. Týmto sa získajú tlakové straty odpovedajúce samotným nosičom katalyzátora zbavené od tlakových strát prázdnej komory. Tento výpočet je potrebný z dôvodu výpočtu tlakových strát, ktoré nezahŕňajú prázdnu komoru, ale len samotný nosič katalyzátora.



Obrázok 6.2 Tlaková strata prázdnej filtračnej komory

$$y = -5E^{-5} \cdot x^3 + 0,0115 \cdot x^2 - 0,1877 \cdot x + 1,6845 \quad (6.1)$$

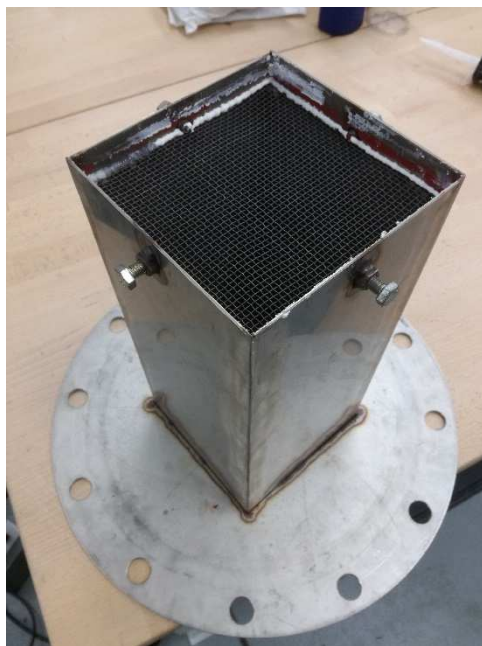
Kde

y	[Pa]	tlaková strata prázdnej filtračnej komory,
x	[m ³ /h]	reálny prietok vzduchu komorou s nosičom katalyzátora.

Výsledky merania sú zhrnuté v nasledujúcich podkapitolách.

6.1 MERANIE TLAKOVEJ STRATY SYPANÉHO LOŽE

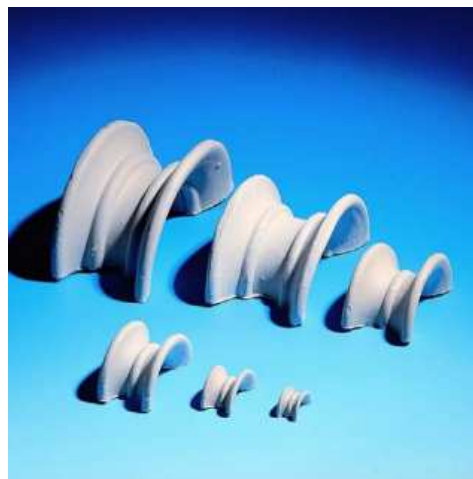
Ako prvé merané nosiče boli sypané lože, a to keramické guľičky a sedielka (obr. 6.4 a 6.5) od firmy Raschig [31]. Hlava filtračnej kolóny bola upravená pre tieto nosiče pridaním sieťky na dno hlavy, aby sa zabránilo vysypávaniu nosičov (obr. 6.3).



Obrázok 6.3 Sieťka na dne hlavy kolóny



Obrázok 6.4 Keramické guľičky Raschig [31]

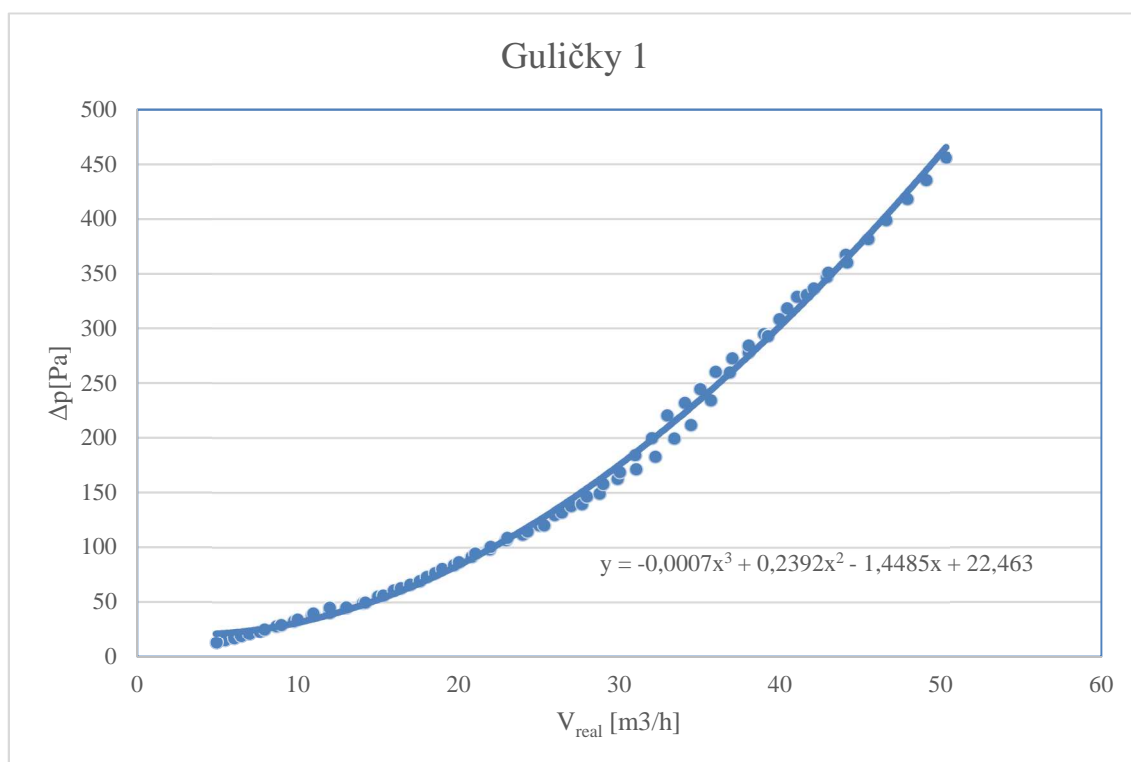


Obrázok 6.5 Keramické sedielka Raschig [31]

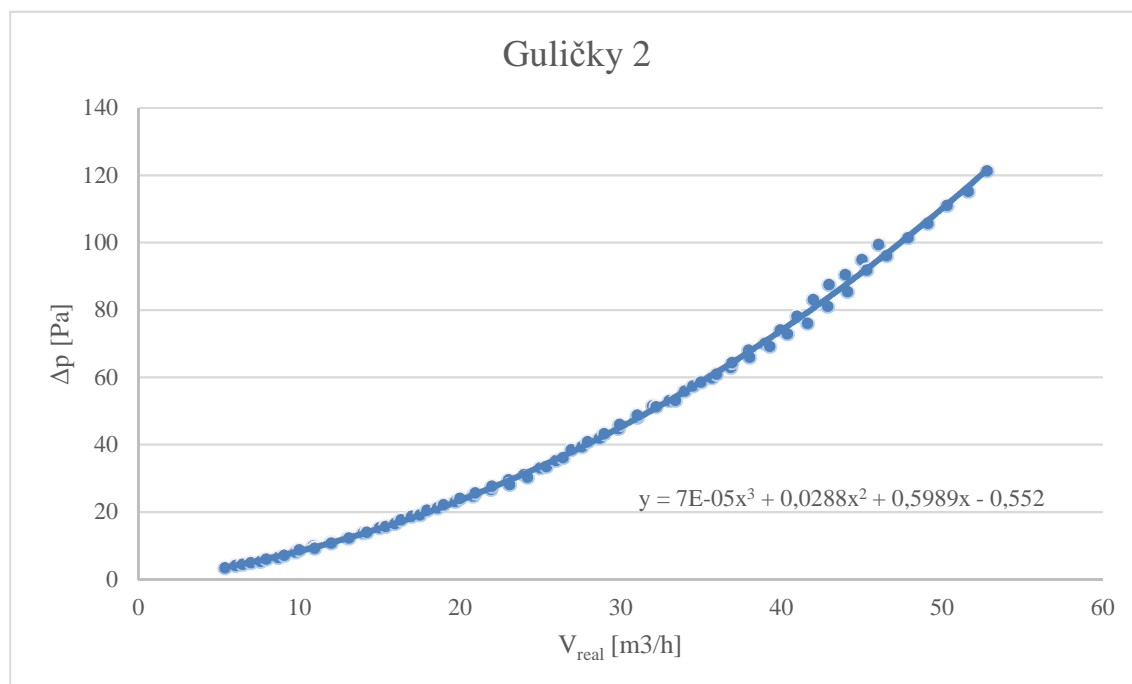
Merané boli dva typy guľičiek a jeden typ sediel a podmienky merania ako aj ich charakteristika je zhrnutá v tab. 6.1. Výsledky merania sú znázornené v grafoch na obr. 6.6 - 6.8 a to v závislosti reálneho prietoku V_{real} na tlakovej strate Δp .

Typ média		Vzduch + vlhkosť 20 %			
Teplota média		22 °C			
Tlak média		101 325 Pa			
Výška lože		150 mm			
Rozmery hlavy kolony		150x150 mm			
Guličky 1		Guličky 2		Sedielka	
Priemer [mm]	3-5	Priemer [mm]	9-10	Priemer [mm]	20
ε [%]	44	ε [%]	44	ε [%]	74
Povrch [m²/m³]	620	Povrch [m²/m³]	390	Povrch [m²/m³]	390
Počet [kus/m³]	8 000 000	Počet [kus/m³]	1 140 000	Počet [kus/m³]	230 000
m [kg/m³]	1400	m [kg/m³]	1 400	m [kg/m³]	660
V _{real} [m³/h]	5 - 50	V _{real} [m³/h]	5 - 53	V _{real} [m³/h]	5 - 50
c [m/s]	0,07 - 0,62	c [m/s]	0,07 - 0,65	c [m/s]	0,07 - 0,62
GHSV [h ⁻¹]	1 481 - 13 034	GHSV [h ⁻¹]	1 463 - 13632	GHSV [h ⁻¹]	1 484 - 13051

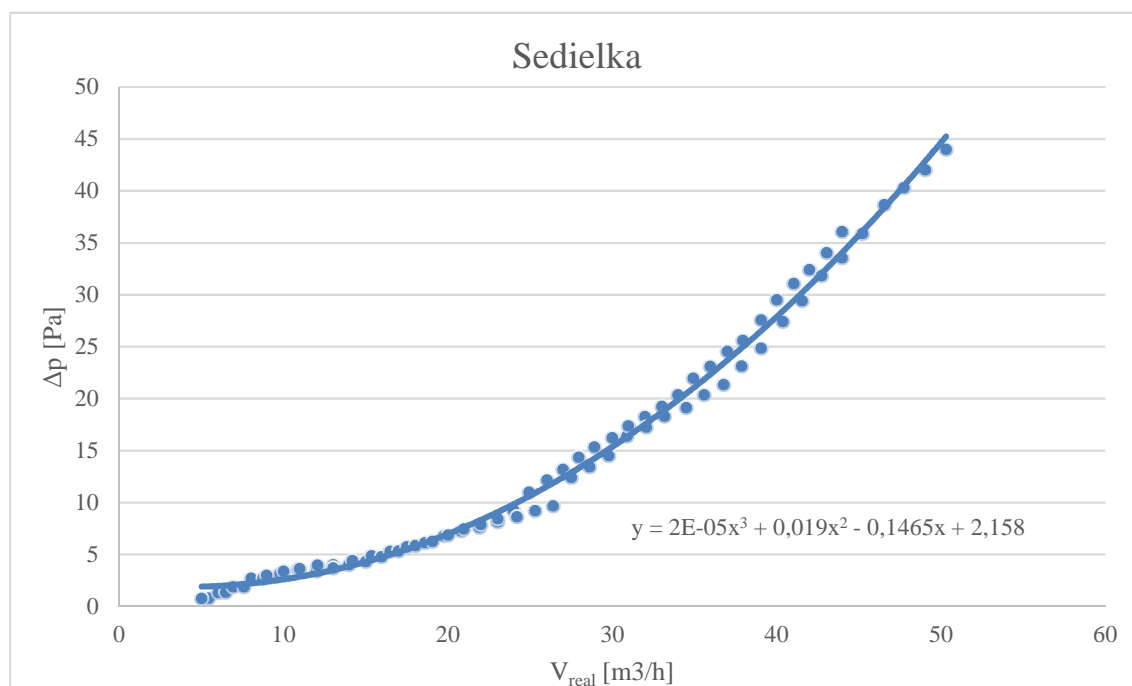
Tabuľka 6.1 Podmienky merania sypaných loží a ich charakteristika.



Obrázok 6.6 Tlaková strata guľičiek 1



Obrázok 6.7 Tlaková strata guľičiek 2

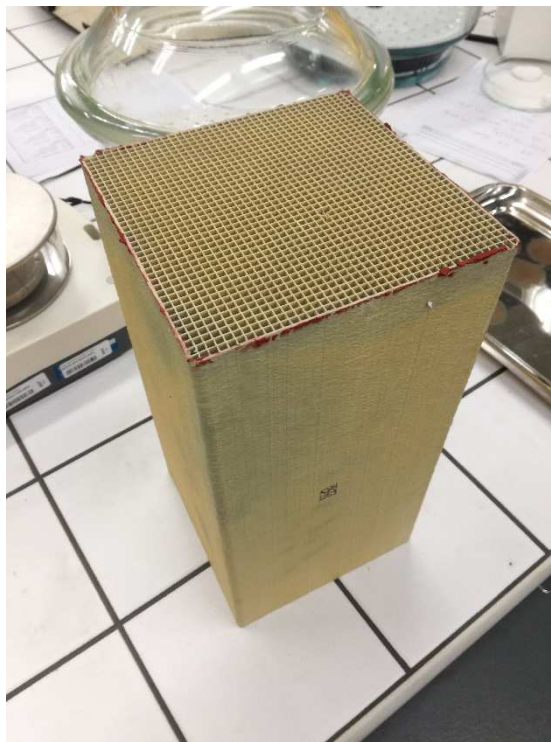


Obrázok 6.8 Tlaková strata sedielok

Ako je zrejmé z grafov, najväčšiu tlakovú stratu majú najmenšie guľičky 1 a najmenšiu sedielka. Je to spôsobené tým, že guľičky majú pravidelný tvar a tvoria tak hustú hmotu, naopak sedielka do seba zapadajú nepravidelne a tvoria hmotu redšiu, cez ktorú vzduch prúdi ľahšie. Pre maximálny prietok 50 m³/h majú guľičky 1 tlakové straty o 410 Pa väčšie ako sedielka, čo je rozdiel 87,5 %. Guľičky 2 majú stratu o 333 Pa (71 %) menšiu ako guľičky 1.

6.2 MERANIE TLAKOVEJ STRATY NOSIČOV HONEYCOMB

Tri vzorky nosičov typu HoneyComb so štvorcovým usporiadaním buniek (obr. 6.9) od firiem BASF a CERAM líšiace sa dĺžkou, počtom buniek a rozmermi buniek boli vložené do komory a uchytené pomocou prítlačných skrutiek a utesnené silikónom.

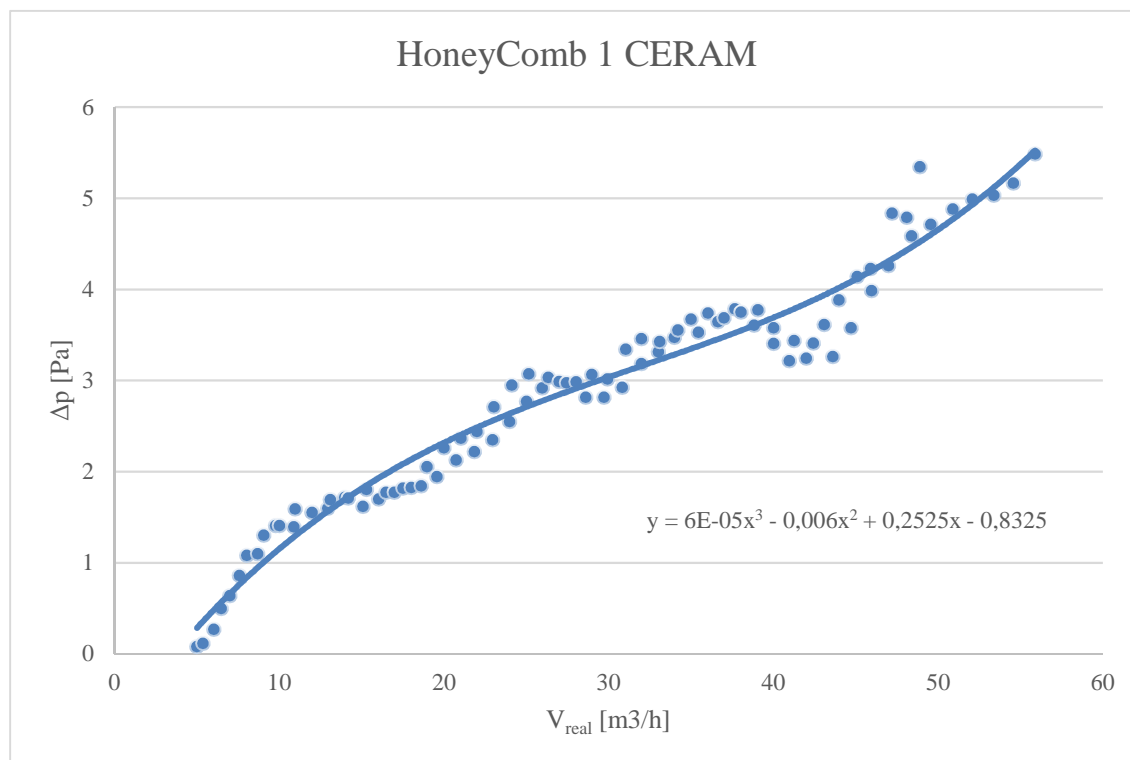


Obrázok 6.9 HoneyComb nosič so štvorcovým usporiadaním buniek

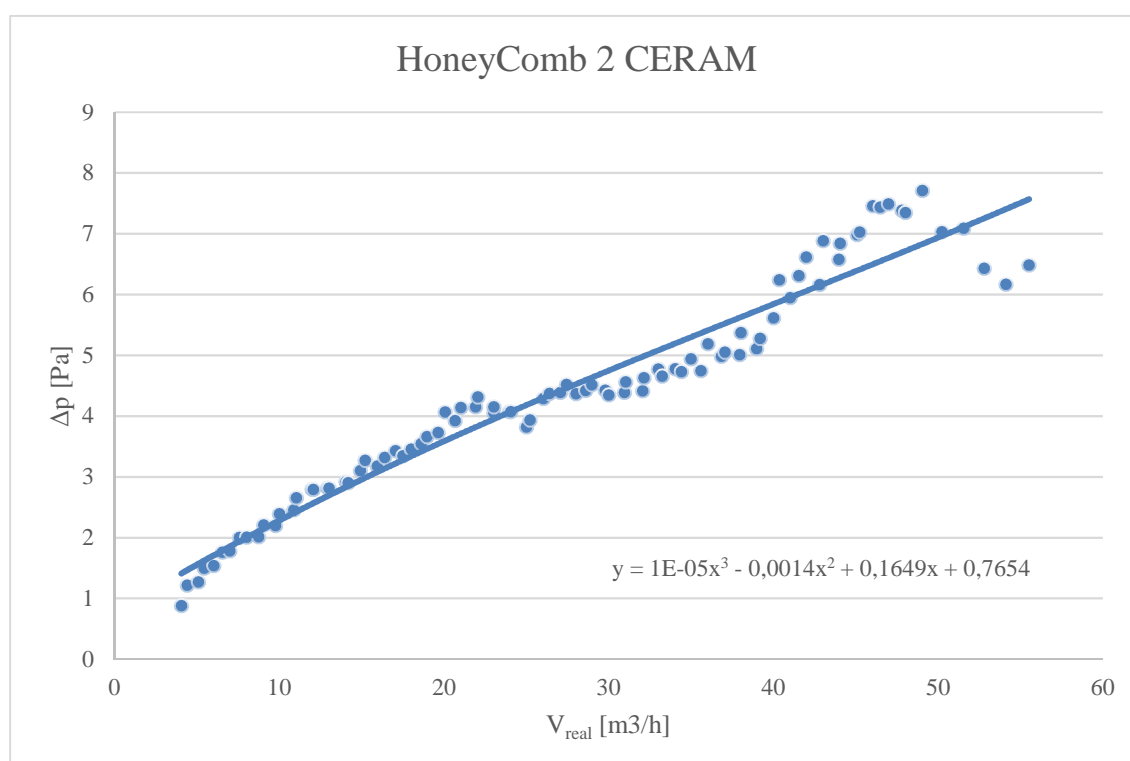
Podmienky merania ako aj ich charakteristika je zhrnutá v tab. 6.2. Výsledky merania sú znázornené v grafoch na obr. 6.10 -6.12 a to v závislosti reálneho prietoku V_{real} na tlakovej strate Δp .

Typ média		Vzduch + vlhkosť 20 %			
Teplota média		22 °C			
Tlak média		101 325 Pa			
Rozmery prietočnej plochy nosičov		150x150 mm			
HoneyComb 1 CERAM		HoneyComb 2 CERAM		HoneyComb 3 BASF	
Dĺžka [mm]	150	Dĺžka [mm]	150	Dĺžka [mm]	300
ε [%]	75,2	ε [%]	73,4	ε [%]	71
Povrch [m²/m³]	694	Povrch [m²/m³]	914	Povrch [m²/m³]	899
Počet buniek	30x30	Počet buniek	40x40	Počet buniek	40x40
D bunky [mm]	4,2	D bunky [mm]	3,2	D bunky [mm]	3,16
V _{real} [m³/h]	5 - 56	V _{real} [m³/h]	4 - 55	V _{real} [m³/h]	4 - 55
c [m/s]	0,0875 - 0,978	c [m/s]	0,068 - 0,94	c [m/s]	0,069 - 0,94
GHSV [h ⁻¹]	1 932- 20 571	GHSV [h ⁻¹]	1 566 – 20 177	GHSV [h ⁻¹]	1 537 – 19 790

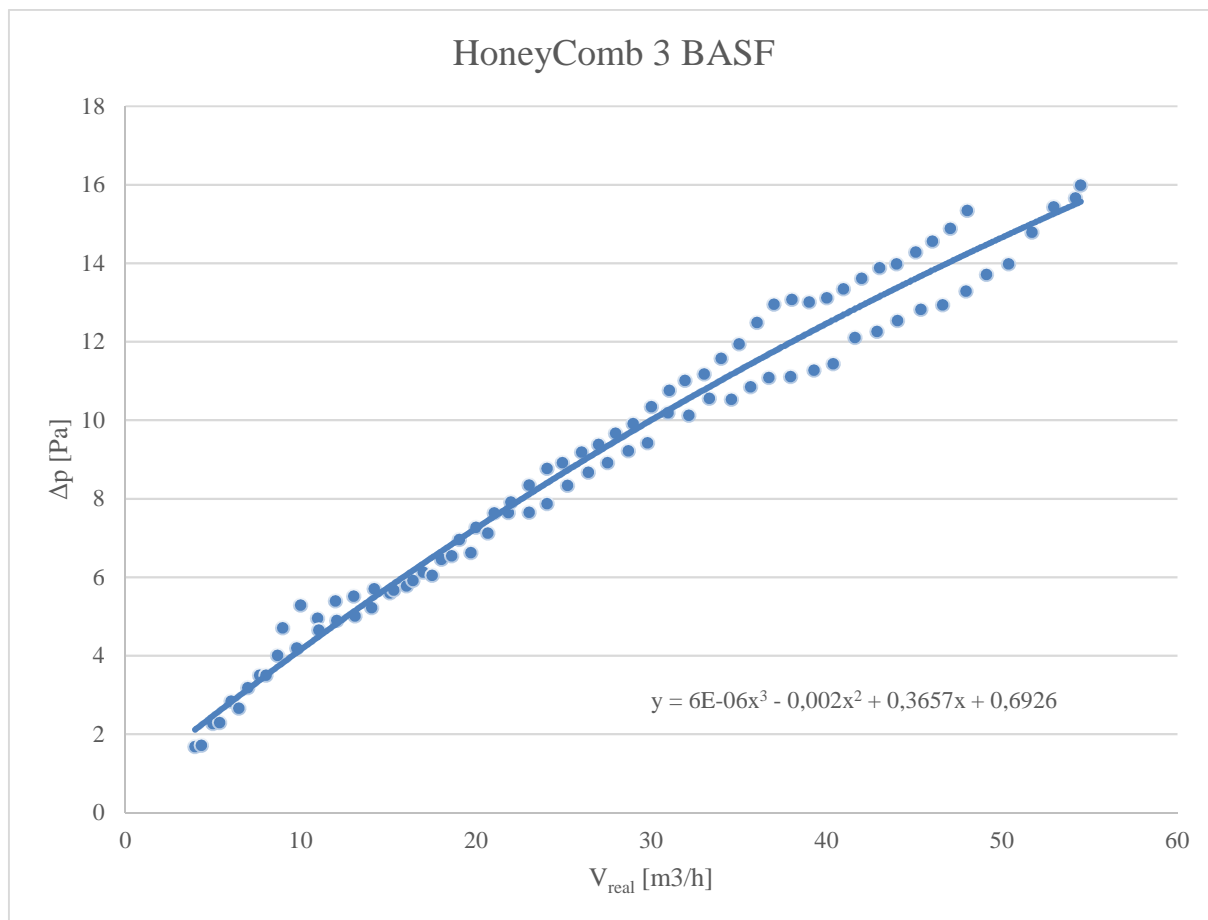
Tabuľka 6.2 Podmienky merania HoneyComb a ich charakteristika.



Obrázok 6.10 Tlaková strata HoneyComb 1 CERAM



Obrázok 6.11 Tlaková strata HoneyComb 2 CERAM



Obrázok 6.12 Tlaková strata HoneyComb 3 BASF

Najväčšie tlakové straty dosahuje HoneyComb 3 BASF z dôvodu hustej siete buniek a dvojnásobnej dĺžky oproti menším nosičom 1 a 2, z ktorých najmenšiu tlakovú stratu dosahuje nosič 1 s počtom buniek 30x30 a teda s najmenším odporom. Pri maximálnom prietoku 55 m³/h má HoneyComb 3 tlakovú stratu o 10,5 Pa väčšiu ako HoneyComb 1, čo je rozdiel 65,6 %. HoneyComb 2 má stratu o 9,5 Pa (59,5 %) menšiu ako HoneyComb 3.

6.3 MERANIE TLAKOVEJ STRATY KERAMICKEJ PENY VUKOPOR

Firma LANIK s.r.o. dodala štyri vzorky keramickej peny VUKOPOR s označením 20 ppi, 40 ppi a dve vzorky 60 ppi líšiace sa veľkosťou. Vyrobené boli na zakázku s rozmermi odpovedajúcimi filtračnej komore INTEQ II. Na penové filtre boli nalepené plechové dosky (obr. 6.13) pre lepšie ukladanie do filtračnej komory a zamedzeniu obtokovým prúdom po obvode peny, ktoré boli následne vložené rovnakým spôsobom ako nosiče HoneyComb.



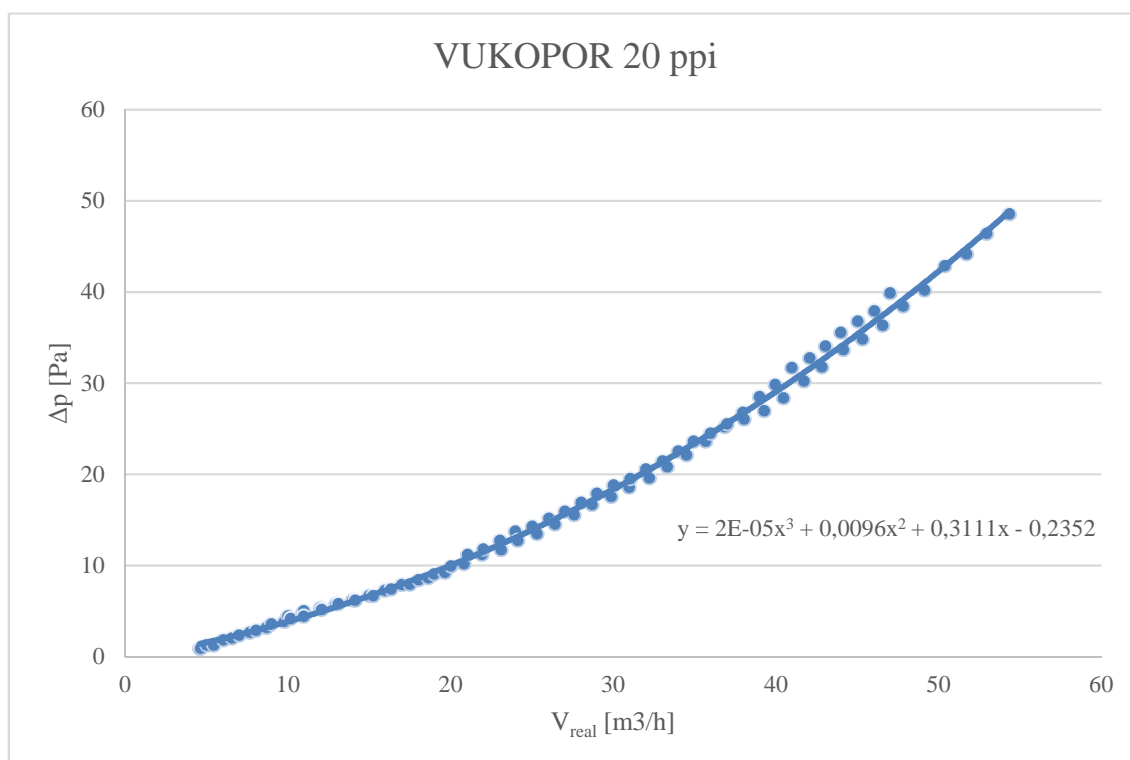
Obrázok 6.13 Keramický filter VUKOPOR

Podmienky merania ako aj ich charakteristika je zhrnutá v tab. 6.3. Výsledky merania sú znázornené v grafoch na obr. 6.14 -6.17 a to v závislosti reálneho prietoku V_{real} na tlakovej strate Δp .

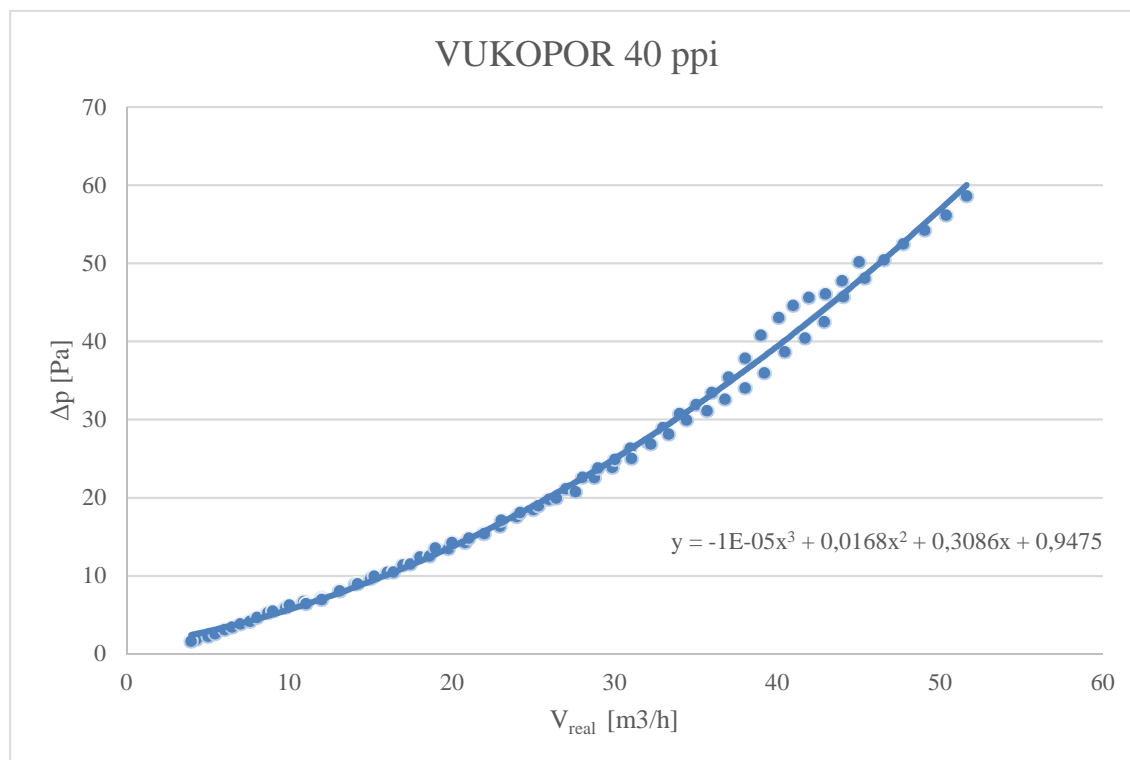
VUKOPOR 60 ppi b) je tvorený dvoma filtermi VUKOPOR 60 ppi a) zlepenými navzájom z dôvodu porovnania tlakovej straty najhustejšieho filtra 60 ppi s rozdielnymi dĺžkami 48 mm a 96 mm.

Typ média		Vzduch + vlhkosť 20 %	
Teplota média		22 °C	
Tlak média		101 325 Pa	
Rozmery prietochnej plochy nosičov		149x149 mm	
VUKOPOR 20 ppi		VUKOPOR 40 ppi	
Dĺžka [mm]	96	Dĺžka [mm]	96
ε [%]	70,9	ε [%]	81,5
Objemová hmotnosť [g/cm ³]	0,44	Objemová hmotnosť [g/cm ³]	0,45
D póru [mm]	1,5	D póru [mm]	0,8
V _{real} [m ³ /h]	4,5 - 54	V _{real} [m ³ /h]	4 – 51,6
c [m/s]	0,057 - 0,679	c [m/s]	0,053 - 0,65
GHSV [h ⁻¹]	2 056- 23 020	GHSV [h ⁻¹]	1 745 – 21 109
VUKOPOR 60 ppi a)		VUKOPOR 60 ppi b)	
Dĺžka [mm]	48	Dĺžka [mm]	96
ε [%]	88,8	ε [%]	88,8
Objemová hmotnosť [g/cm ³]	0,35	Objemová hmotnosť [g/cm ³]	0,35
D póru [mm]	0,9	D póru [mm]	0,9
V _{real} [m ³ /h]	4 - 53	V _{real} [m ³ /h]	4 - 53
c [m/s]	0,049 - 0,662	c [m/s]	0,052 - 0,662
GHSV [h ⁻¹]	3 434- 43 119	GHSV [h ⁻¹]	1 806 – 21 151

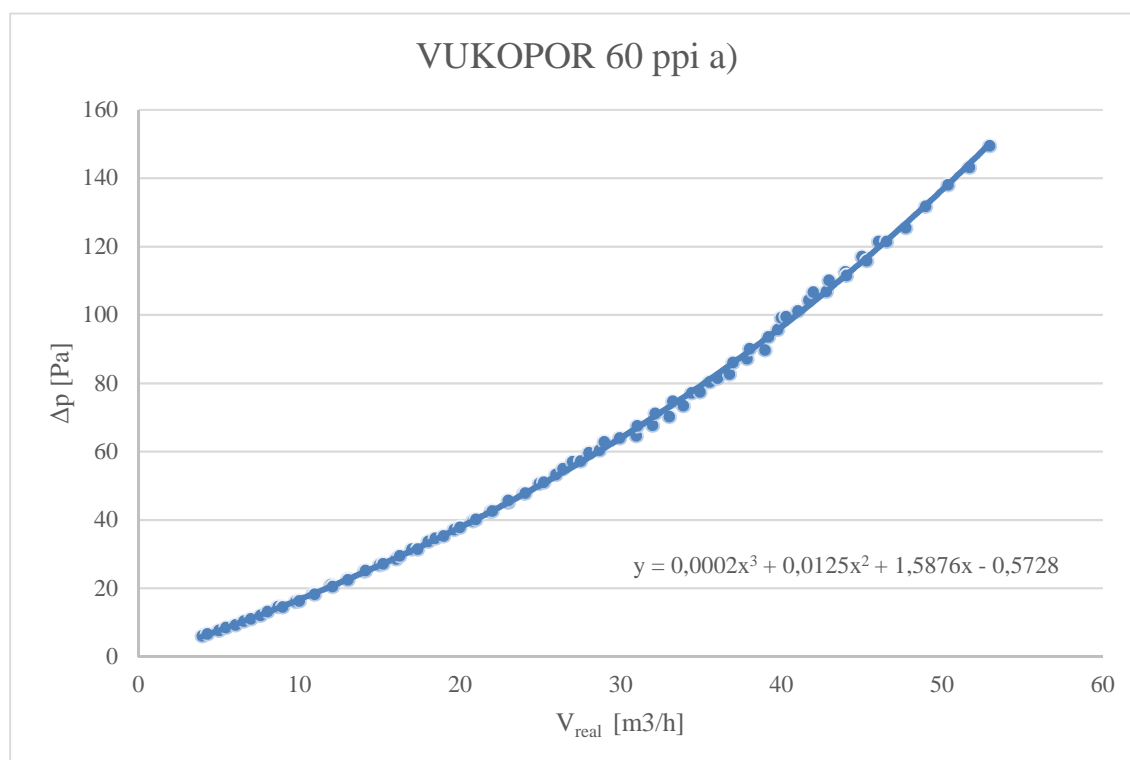
Tabuľka 6.3 Podmienky merania filtrov VUKOPOR a ich charakteristika.



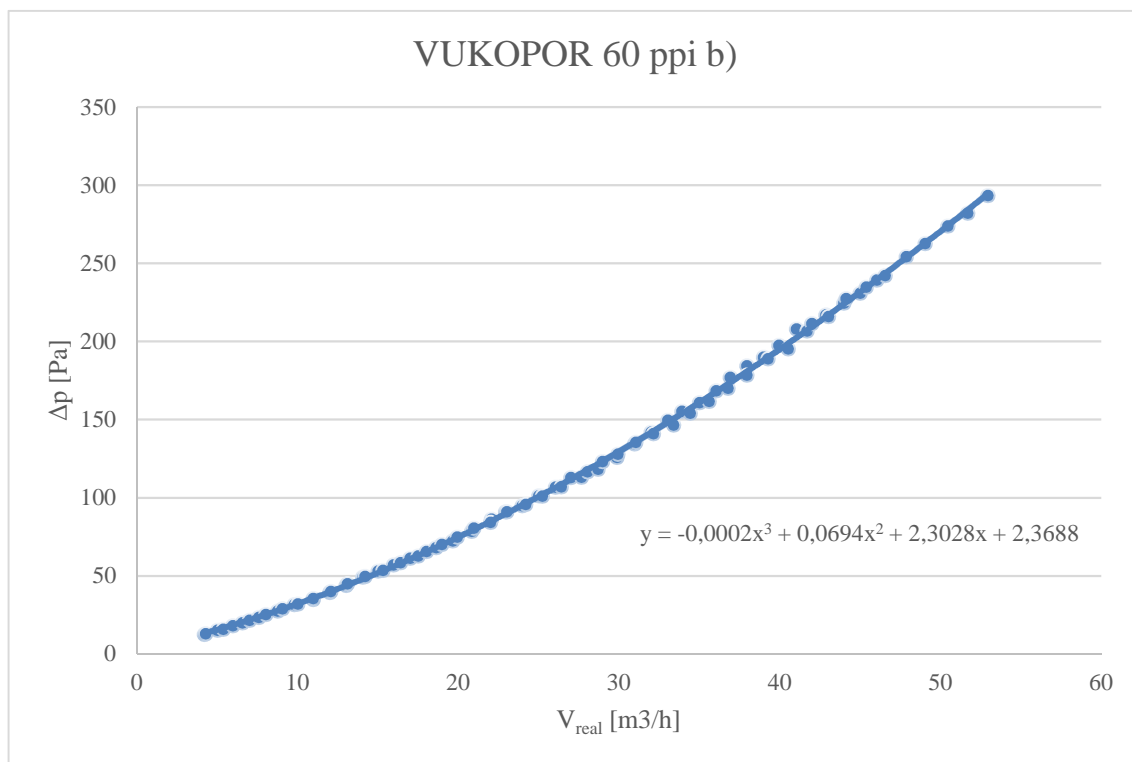
Obrázok 6.14 Tlaková strata VUKOPOR 20 ppi



Obrázok 6.15 Tlaková strata VUKOPOR 40 ppi



Obrázok 6.16 Tlaková strata VUKOPOR 60 ppi a)



Obrázok 6.17 Tlaková strata VUKOPOR 60 ppi b)

Z grafov je zrejмый vývoj tlakových strát podľa hustoty a veľkosti buniek, a to od najmenších strát filtra 20 ppi až po najväčšie straty filtrov 60 ppi. Pri filtroch 60 ppi je tlaková strata približne 2-krát väčšia u zlepeného filtra 96 mm oproti veľkosti 48 mm. Pri maximálnom prietoku 51,5 m³/h má VUKOPOR 60 ppi b) tlakovú stratu o 238 Pa väčšiu ako VUKOPOR 20 ppi, čo je rozdiel 84,4 %. VUKOPOR 40 ppi má stratu o 223 Pa (79 %) menšiu ako VUKOPOR 60 ppi b).

7 VYHODNOTENIE VÝSLEDKOV

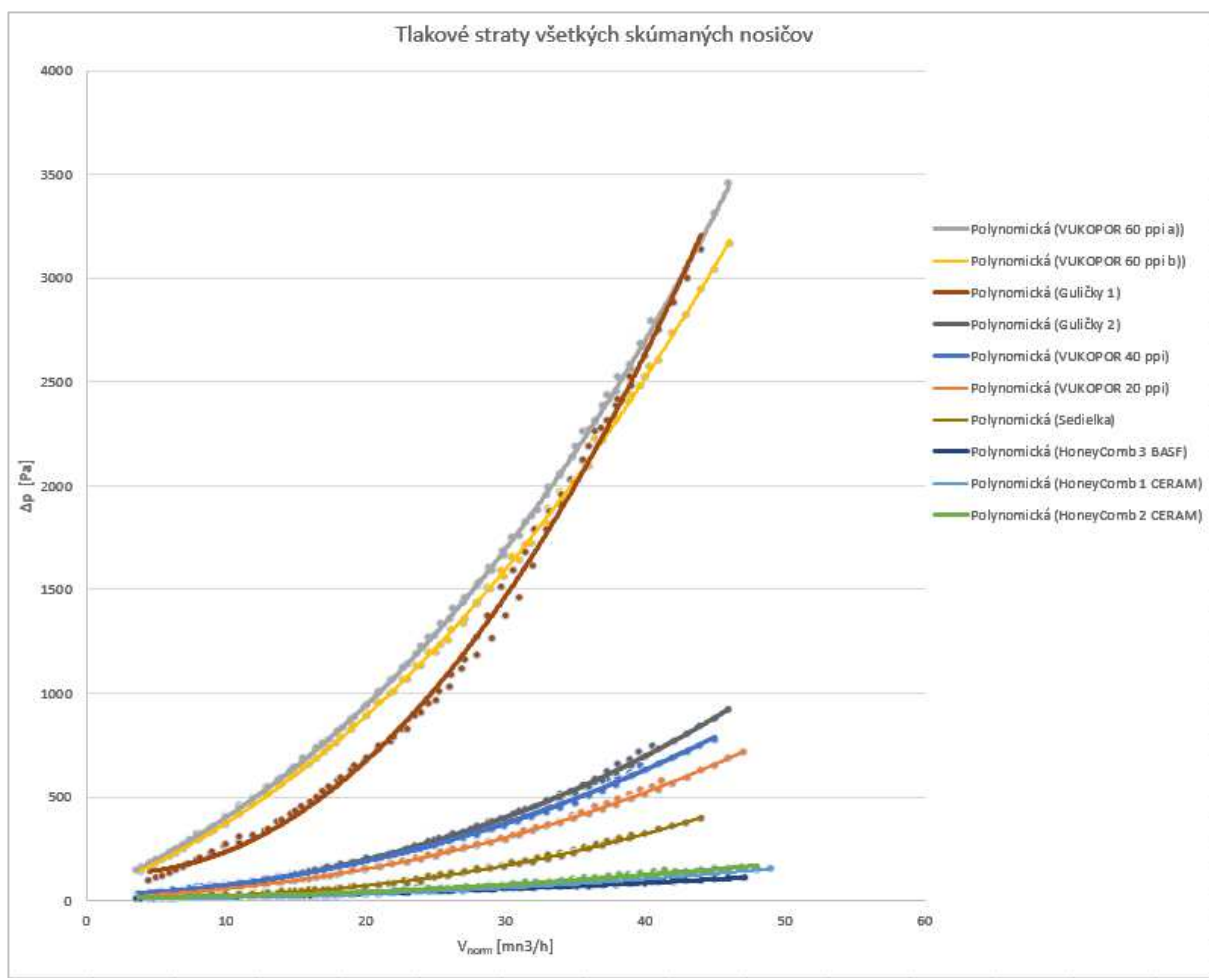
Keďže jednotlivé vzorky skúmaných nosičov katalyzátorov sú rôznych veľkostí, je potrebný prepočet tlakových strát na referenčnú veľkosť 1 m pre potreby porovnania nosičov. Na základe podobnostnej analýzy rovnice (7.1) sa vypočíta tlaková strata Δp_{ref} vyjadrená na 1 m výplne/veľkosti nosiča katalyzátora.

$$\frac{\Delta p_{ref}}{l_{ref}} = \frac{\Delta p}{l} \quad (7.1)$$

Kde

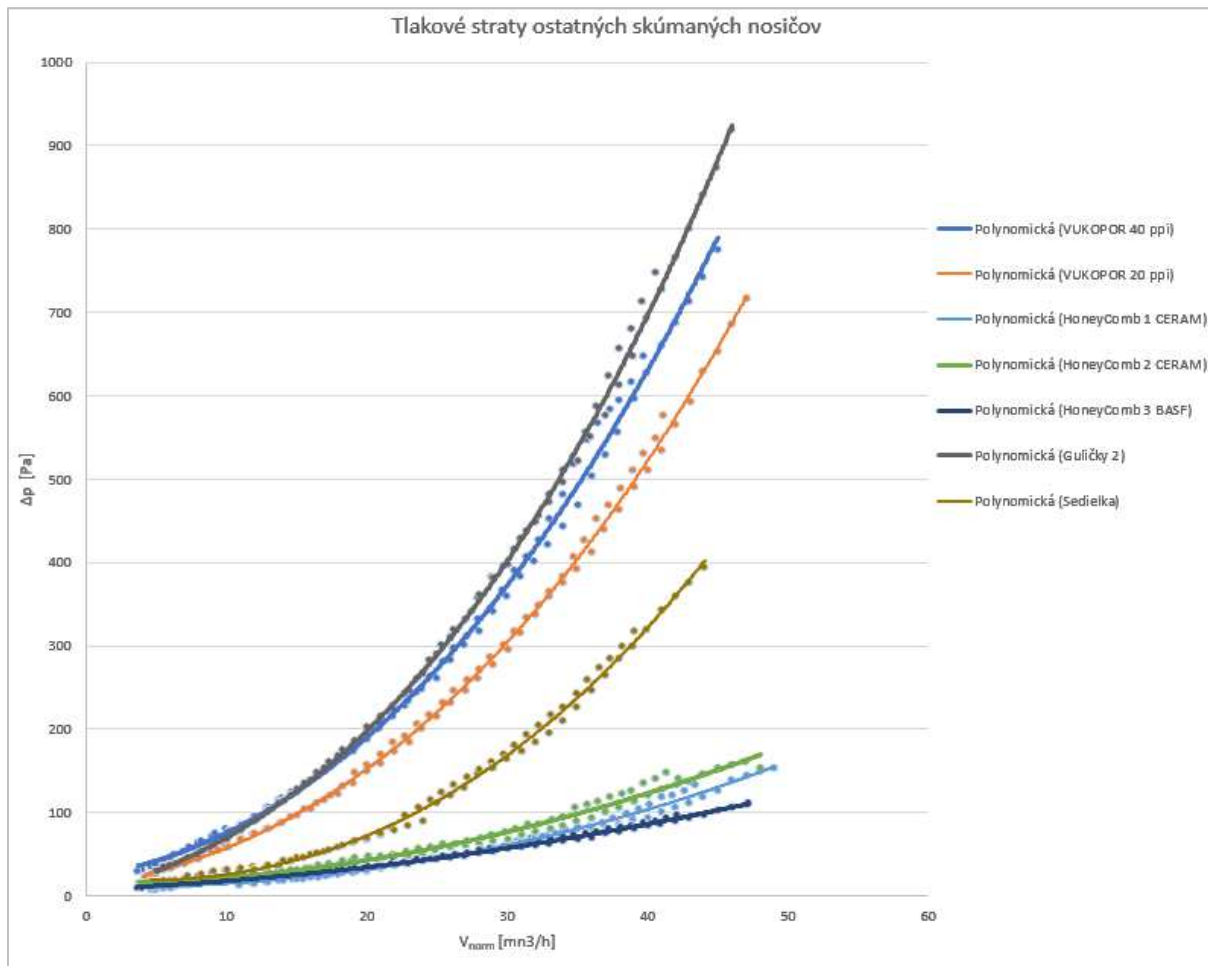
Δp_{ref} [Pa]	referenčná tlaková strata veľkosti nosiča 1 m,
l_{ref} [m]	referenčná veľkosť náplne nosiča 1 m,
Δp [Pa]	tlaková strata nosiča,
l [m]	veľkosť nosiča.

Vyhodnotenie takto upravených tlakových strát vzhľadom k normálnemu prietoku vzduchu všetkým skúmaným nosičom katalyzátorov je na obr. 7.1.



Obrázok 7.1 Zhrnutie tlakových strát všetkých skúmaných nosičov

Ako je z grafu na obr. 7.1 zrejmé, najväčšie tlakové straty dosahuje VUKOPOR 60 ppi a), 60 ppi b) a guľičky 1. Jedná sa o najhustejšiu sieť keramických filtrov a najmenšie guľičky s najväčším povrchom, čo z nich robí nosiče s najväčším odporom vzduchu a teda najväčšou tlakovou stratou. Pre názornejšie porovnanie ostatných nosičov je detailnejší graf na obr. 7.2.



Obrázok 7.2 Zhrnutie tlakových strát ostatných skúmaných nosičov

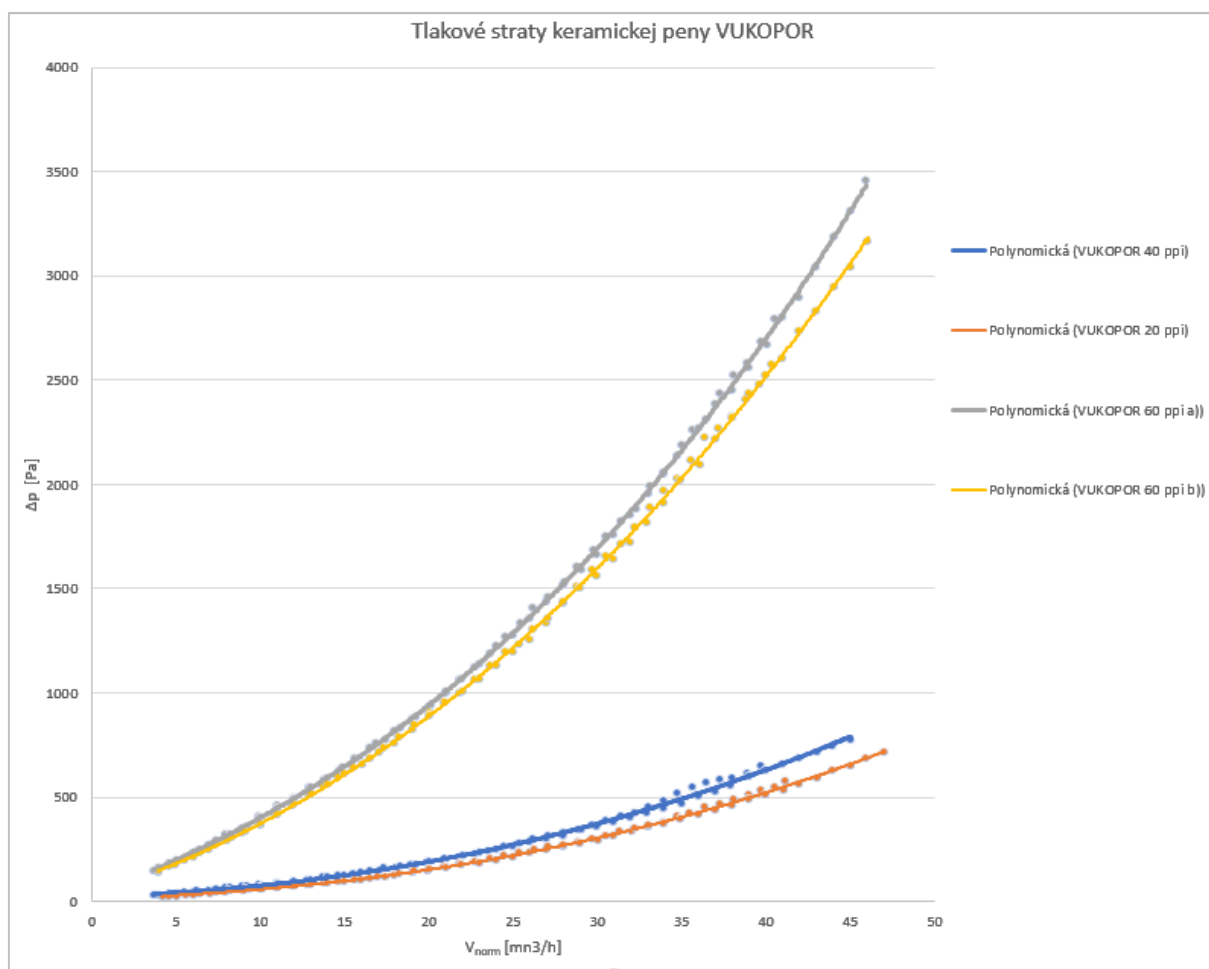
Z ostatných nosičov dosahujú najväčšie tlakové straty nosiče guľičky 2 a keramické filtre VUKOPOR 40 ppi a 20 ppi. Nasledujú sedielka a najmenšiu tlakovú stratu dosahujú HoneyComb 2, 1 a 3. Celkové porovnanie všetkých nosičov vzhľadom k zvolenému referenčnému normálnemu prietoku vzduchu $44 \text{ m}^3/\text{h}$ voči tlakovým stratám nosiča s najmenšími stratami je v tab. 7.1.

Nosič Katalyzátora	Referenčný prietok [m _N ³ /h]	Tlaková strata [Pa]	Rozdiel tlakovej straty [Pa]	Rozdiel tlakovej straty [%]
<i>Honeycomb 3</i>	44	96,6	-	-
<i>Honeycomb 1</i>	44	119,3	22,7	23,5
<i>Honeycomb 2</i>	44	146,6	50	51,8
<i>Sedielka</i>	44	393,3	296,7	307,1
<i>VUKOPOR 20 ppi</i>	44	629,3	532,7	551,4
<i>VUKOPOR 40 ppi</i>	44	741,6	645	667,7
<i>Guličky 2</i>	44	840	743,4	769,6
<i>VUKOPOR 60 ppi b)</i>	44	2949	2852,4	2952,8
<i>Guličky 1</i>	44	3140	3043,4	3150,5
<i>VUKOPOR 60 ppi a)</i>	44	3187,5	3090,9	3199,7

Tabuľka 7.1 Celkové porovnanie nosičov voči nosiču s najmenšími tlakovými stratami

7.1 VYHODNOTENIE KERAMICKÝCH FILTROV VUKOPOR

Keďže keramické filtre VUKOPOR majú vďaka vysokým hodnotám (najväčším zo skúmaných vzoriek) medzerovitosti a mernému povrchu potenciál použitia v oblasti katalytickej redukcie, je potrebné vyhodnotenie z pohľadu tlakových strát. Na obr. 7.3 sú znázornené straty samotnej keramickej peny.



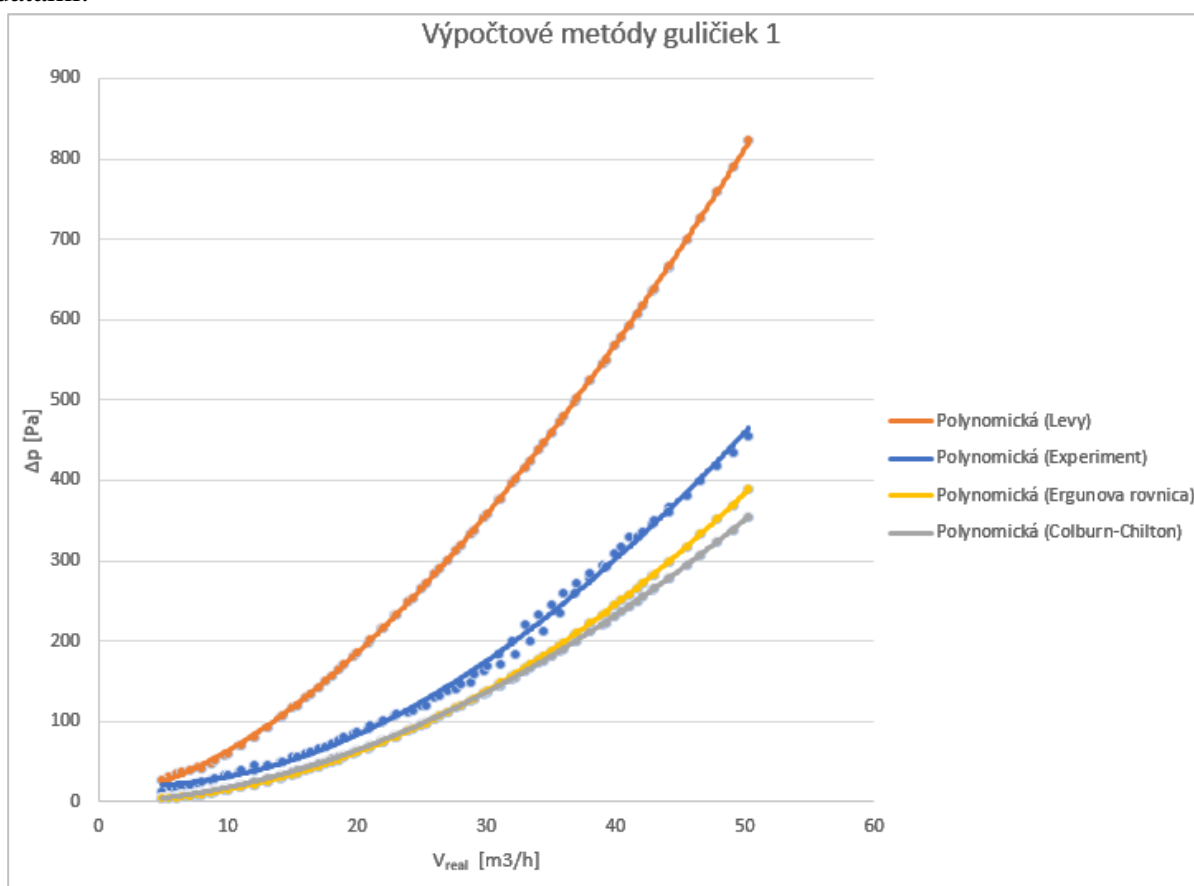
Obrázok 7.3 Tlakové straty keramickej peny VUKOPOR

Vzorka 60 ppi a) je najmenšia vzorka o veľkosti 48 mm, no dosahuje najväčších strát z dôvodu najhustejšej siete buniek. Vzorka 60 ppi b) je vytvorená zlepením dvoch vzoriek 60 ppi a), no ako je znázornené na grafe 7.3 lepenie nemá zásadný vplyv na tlakové straty. Tieto vzorky dosahujú podobné straty ako guľičky 1 a keďže pena má dvojnásobnú hodnotu medzerovitosti tak sa javí ako výhodnejší nosič. Vzorky 40 a 20 ppi majú podstatne menšie tlakové straty, podobné guľičkám 2 a sedielkam. Použitie keramických filtrov by tak mohlo byť výhodné v oblasti katalytickej filtrácie, no bolo by nutné vykonať štúdiu účinnosti filtrácie, ekonomickú rozvahu nákladov na prevádzku ako aj investičných nákladov a taktiež aj úroveň zanášania nečistotami pri filtrácii v porovnaní so sypanými ložami.

V nasledujúcich kapitolách budú zhrnuté výsledky jednotlivých výpočtových metód tlakových strát a ich vhodnosť použitia u jednotlivých nosičoch.

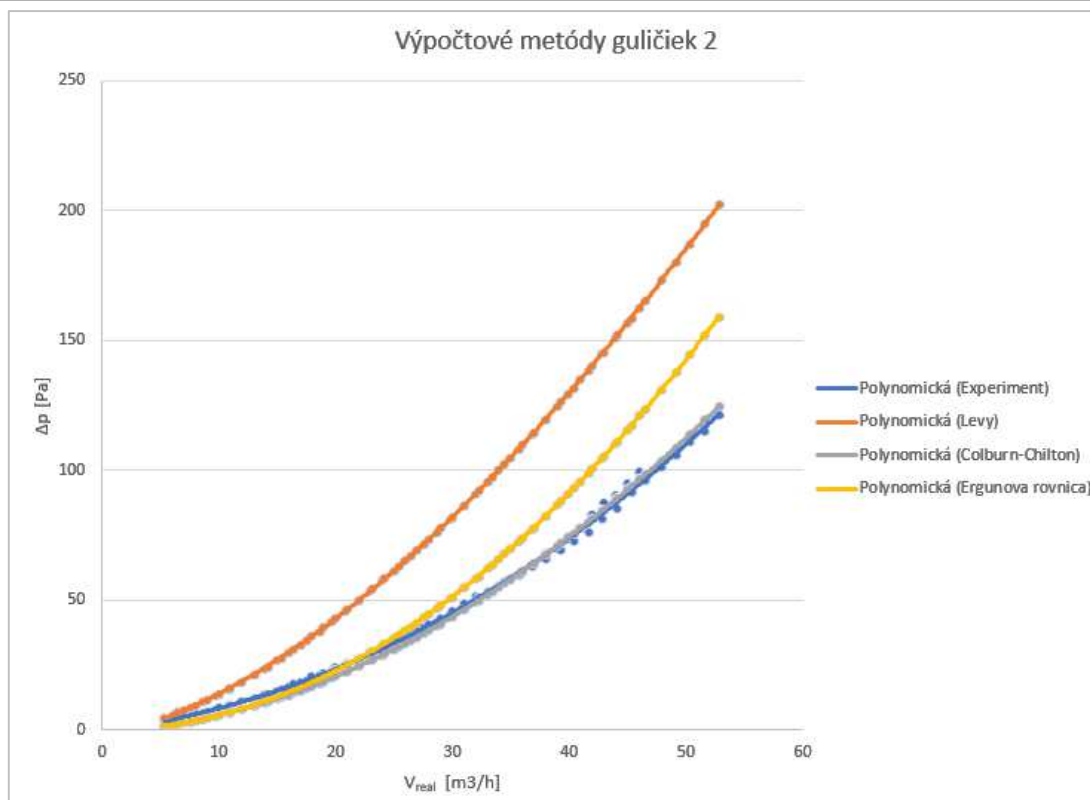
7.2 VÝPOČET TLAKOVÝCH STRÁT SYPANÝCH LOŽÍ

V tejto kapitole budú zhrnuté výsledky výpočtov tlakových strát a vyhodnotená vhodnosť použitia metód podľa kap. 4.1. Výpočty ako aj všetky potrebné vstupujúce konštanty sú spracované v programe Excel v prílohe. Na obr. 7.4 sú znázornené výsledky metód Levyho rovnica, Ergunova rovnica a Colburn-Chilton rovnica v porovnaní s experimentálnymi dátami.



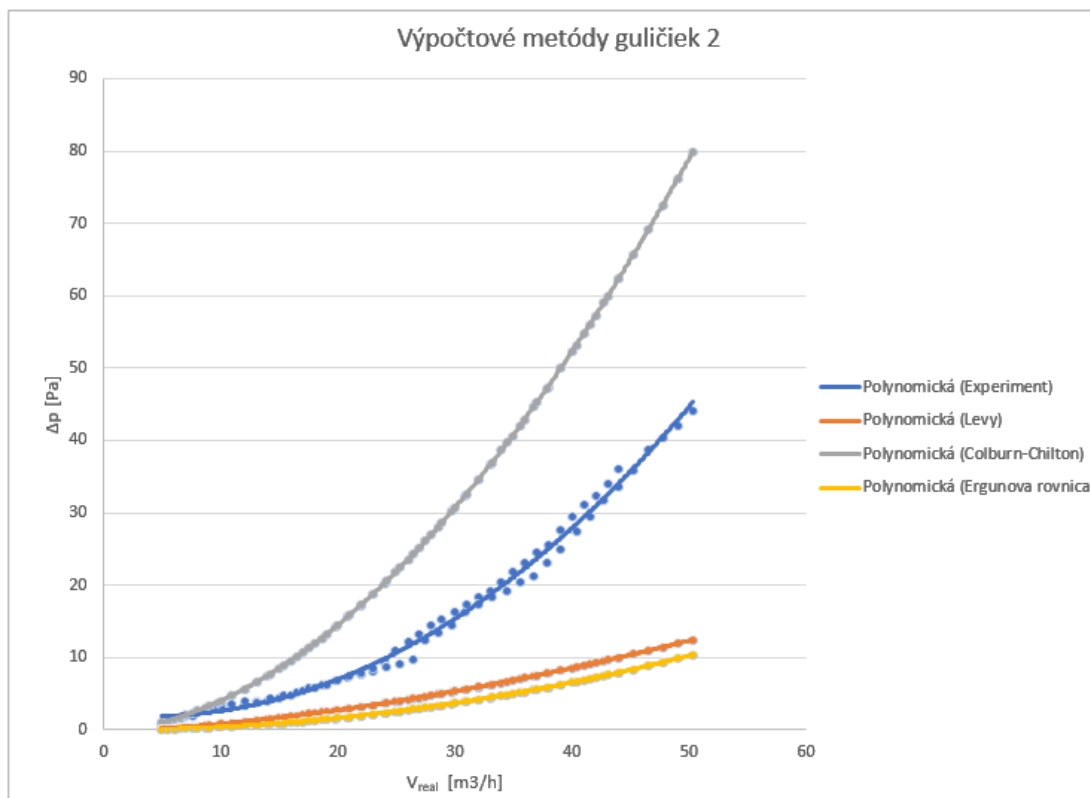
Obrázok 7.4 Výpočtové metódy nosiča guľičky 1 v porovnaní s experimentálnymi dátami

Metóda podľa Levyho vykazuje o 44,5 % väčšiu tlakovú stratu spôsobenú nosičom **guľičky 1** oproti experimentálnym dátam a metódam podľa Colburn-Chilton a Ergunovej rovnice. Tieto dve metódy sa približujú experimentálnym dátam a preto sú z trojice metód najvhodnejšie. Colburn-Chilton sa voči experimentálnym dátam odchyľuje o 22 % a Ergunova rovnica o 15 %. U Levyho metódy sa počítajú parametre „ n “ a „ f_m “ podľa rovníc 4.7-4.12 odvodených z grafu na základe typu prúdenia v nosiči. Ide tak o metódu, kde sa môžu vyskytovať nepresnosti pre tento typ nosičov, nakoľko sa jedná o metódu určenú pre valcové častice.



Obrázok 7.5 Výpočtové metódy nosiča guľičiek 2 v porovnaní s experimentálnymi dátami

U vzorku **guľičky 2** (obr. 7.5) platí rovnaký záver ako u guľičiek 1, aj keď rozdiel medzi experimentálnymi dátami a hodnotami podľa Levyho je 41 %.



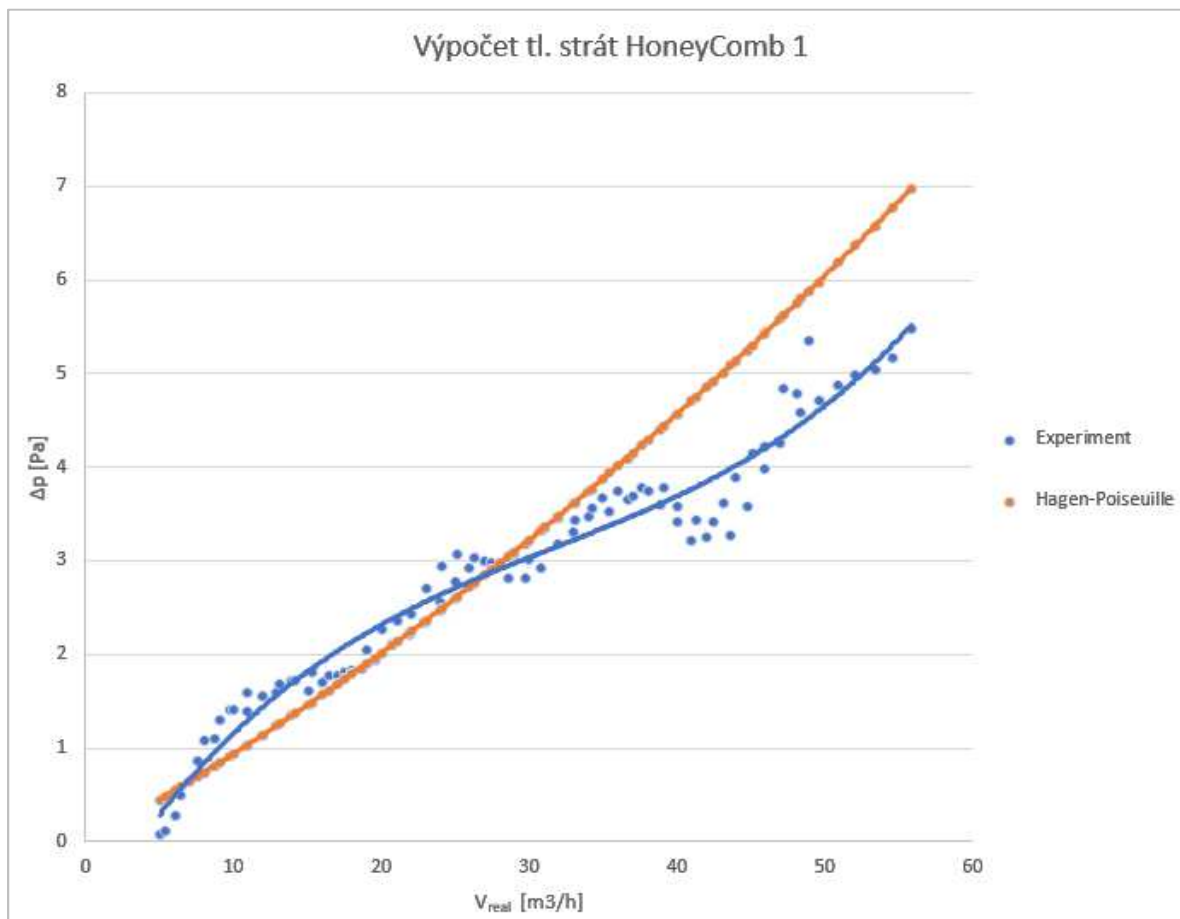
Obrázok 7.6 Výpočtové metódy nosiča sedielka v porovnaní s experimentálnymi dátami

Na obr. 7.6 sú nosiče sedielka a vysoká odlišnosť všetkých metód výpočtov od experimentálnych dát. Levy sa odchyľuje o 73 %, Colburn-Chilton o 44 % a Ergunova rovnica o 77 %. Všetky metódy sú citlivé na medzerovitosť lože, ktorá sa u sedielok počas experimentu môže meniť z dôvodu rôzneho vzájomného uloženia sedielok, ktoré vychádza z ich tvaru. Najvhodnejšie metódy pre sedielka sú Levy a Ergunova rovnica.

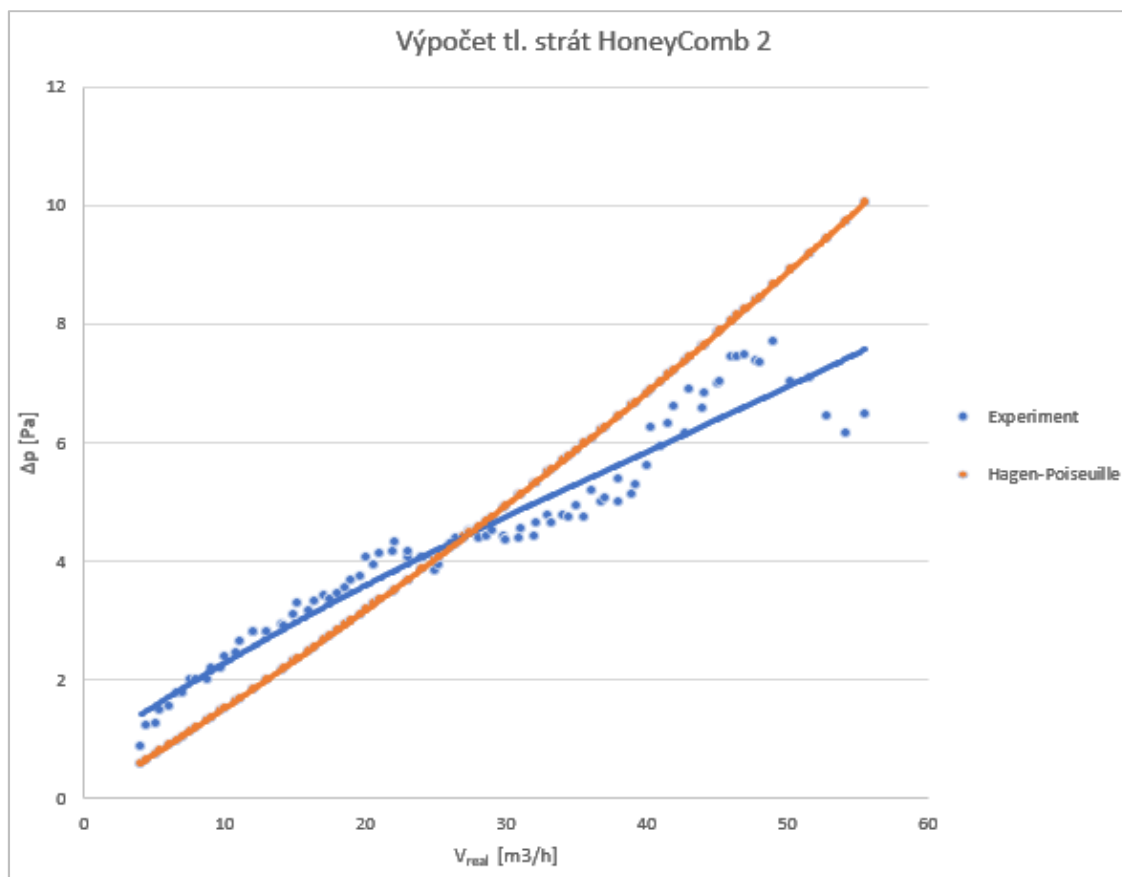
Z výsledkov výpočtov sa dá usúdiť, že pre nosiče typu guľičky je metóda Levy nevhodná, naopak Colburn-Chilton a Ergunova rovnica vykazujú uspokojivé výsledky a sú teda vhodné pre popis tlakových strát guľičkového lože. U sedielok nie je uspokojivá ani jedna metóda, no najlepšie výsledky poskytuje Levy a Colburn-Chilton.

7.3 VÝPOČET TLAKOVÝCH STRÁT NOSIČOV HONEYCOMB

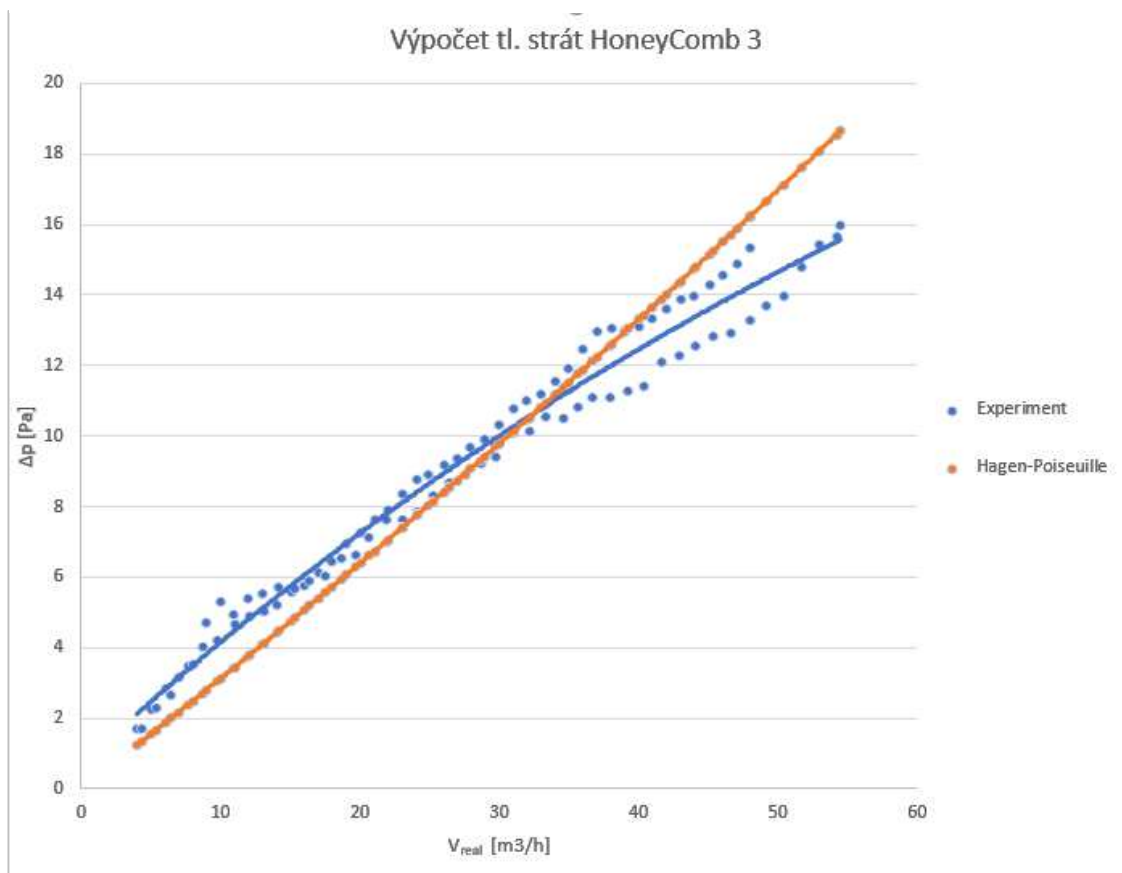
V tejto kapitole budú zhrnuté výsledky výpočtov tlakových strát a vyhodnotená vhodnosť použitia metódy podľa kap. 4.2. Výpočty ako aj všetky potrebné vstupujúce konštanty sú spracované v programe Excel v prílohe. Výpočet dokázal laminárne prúdenie v celom rozsahu merania. Honeycomb vykazujú najmenšie tlakové straty zo všetkých nosičov a tak mala na jej hodnotu najväčší vplyv strata prázdnej komory, ktorá bola odčítaná od experimentálne získaných strát. Na nasledujúcich obrázkoch sú znázornené výsledky metódy Hagen-Poiseuille v porovnaní s experimentálnymi dátami jednotlivých nosičov HoneyComb.



Obrázok 7.7 Porovnanie výpočtových výsledkov s experimentálnymi dátami HoneyComb 1



Obrázok 7.8 Porovnanie výpočtových výsledkov s experimentálnymi dátami HoneyComb 2

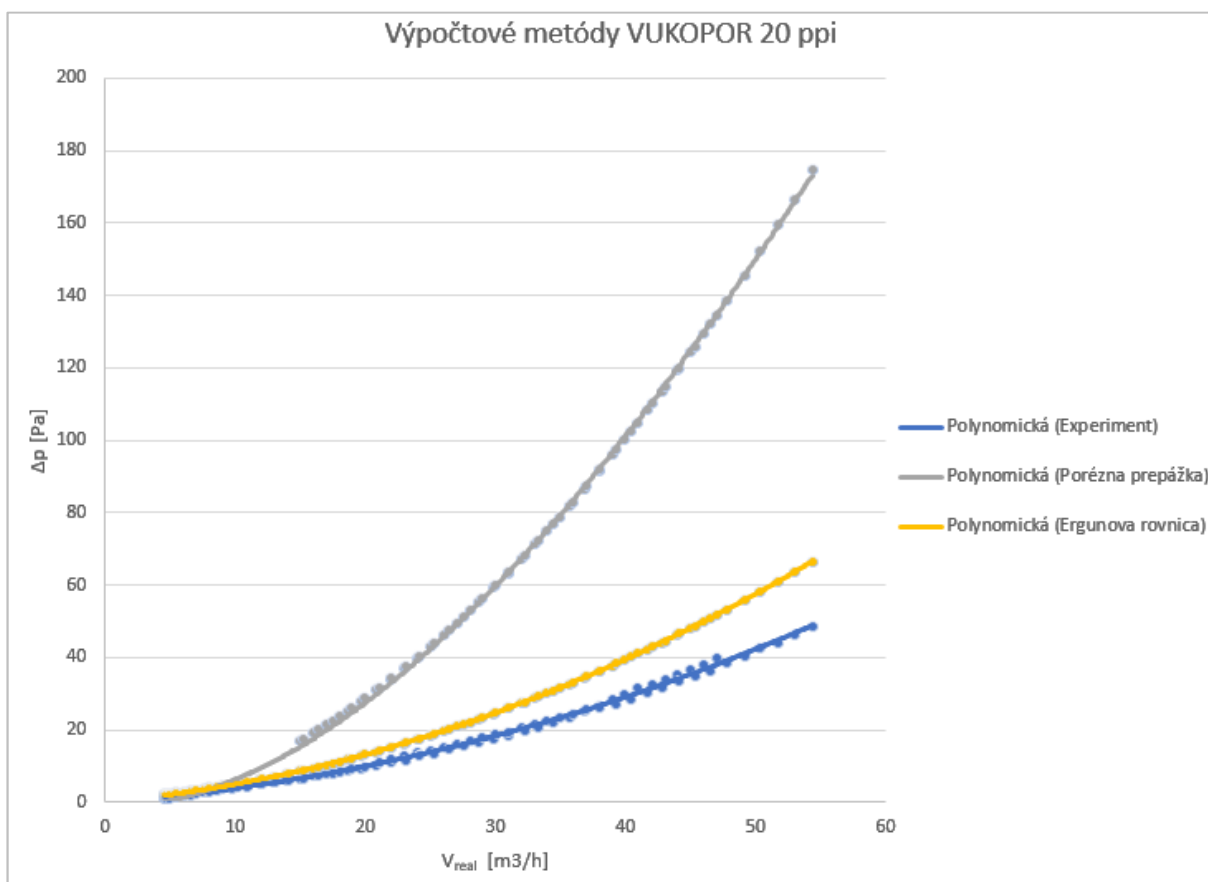


Obrázok 7.9 Porovnanie výpočtových výsledkov s experimentálnymi dátami HoneyComb 3

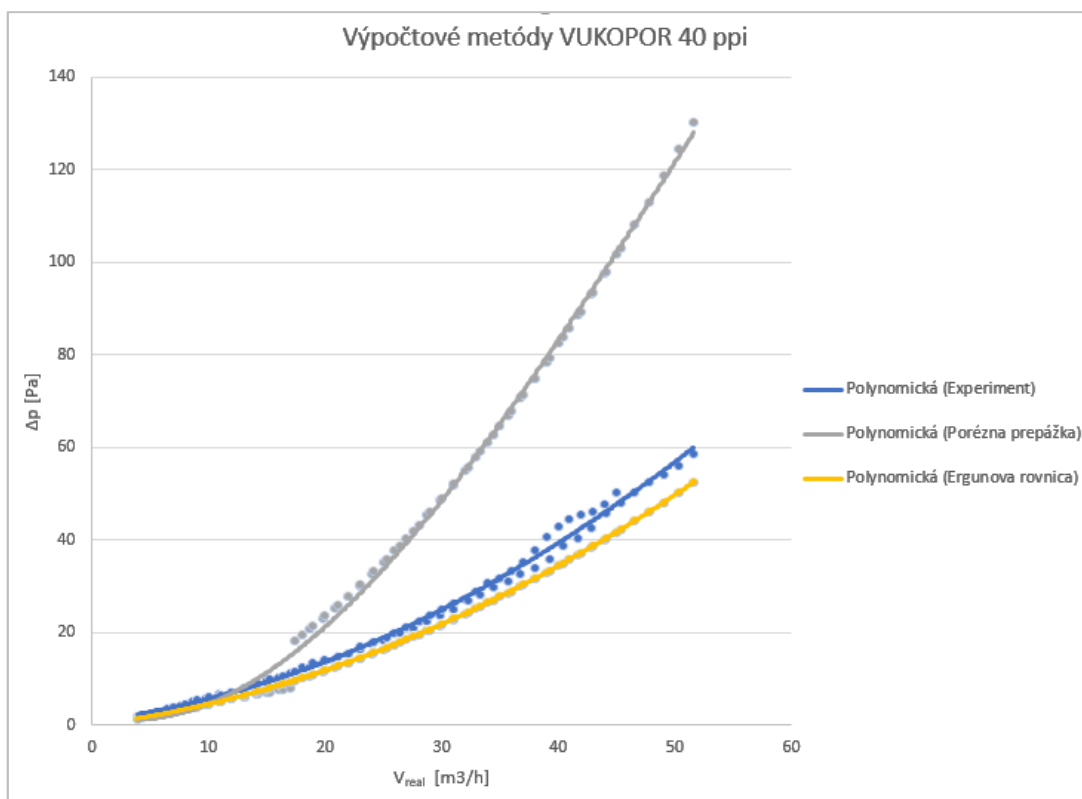
Vďaka jednoduchosti štruktúry nosičov HoneyComb sa experimentálne dáta a výpočty pomocou Hagen-Poiseuille odlišujú len v zanedbateľných odchýlkach (14 - 35 %) a jedná sa tak o vhodnú metódu výpočtu tlakových strát tohto nosiča. V praxi sa ďalej využívajú výpočty pomocou výpočtových programov CFD pri použití iných zložitejších štruktúr nosičov.

7.4 VÝPOČET TLAKOVÝCH STRÁT KERAMICKEJ PENY VUKOPOR

V tejto kapitole budú zhrnuté výsledky výpočtov tlakových strát a vyhodnotená vhodnosť použitia metód podľa kap. 4.3. Výpočty ako aj všetky potrebné vstupujúce konštanty sú spracované v programe Excel v prílohe. Výpočty strát týchto nosičov boli zo všetkých nosičov najobťažnejšie z dôvodu komplikovanej štruktúry VUKOPORu. Na nasledujúcich obrázkoch sú znázornené výsledky metód Ergunova rovnica a poréznej prepážky v porovnaní s experimentálnymi dátami jednotlivých nosičov VUKOPOR.

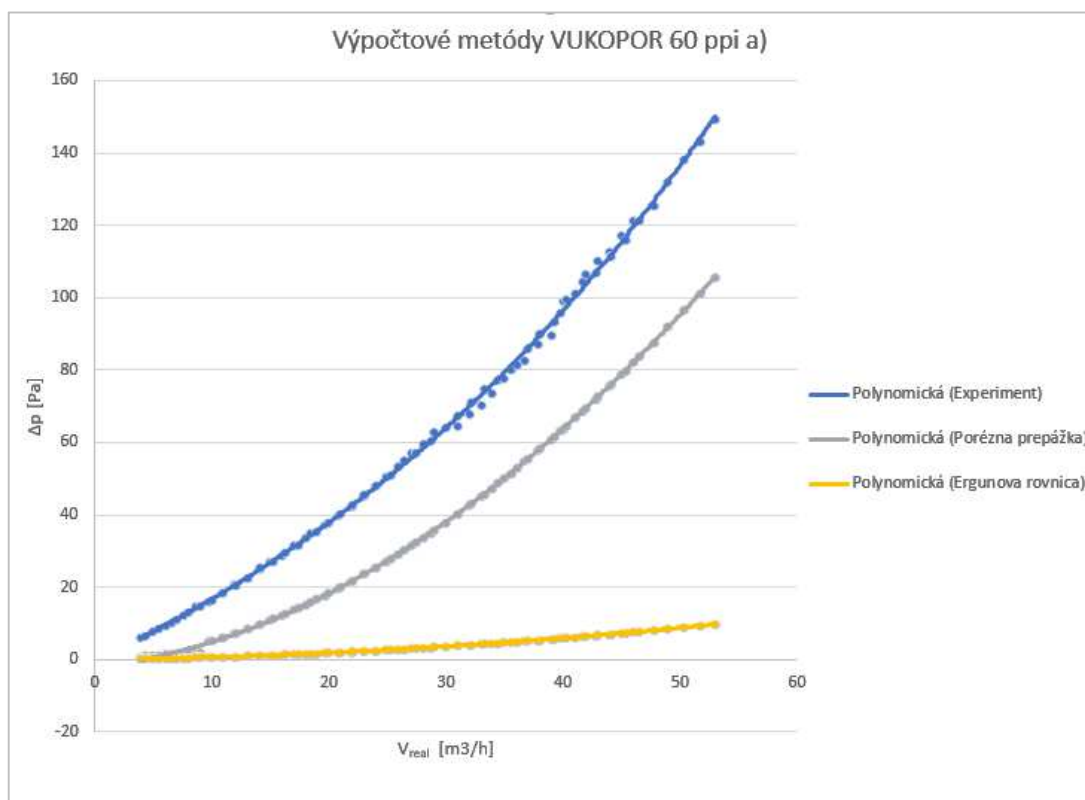


Obrázok 7.10 Porovnanie výpočtových výsledkov s experimentálnymi dátami VUKOPOR 20 ppi

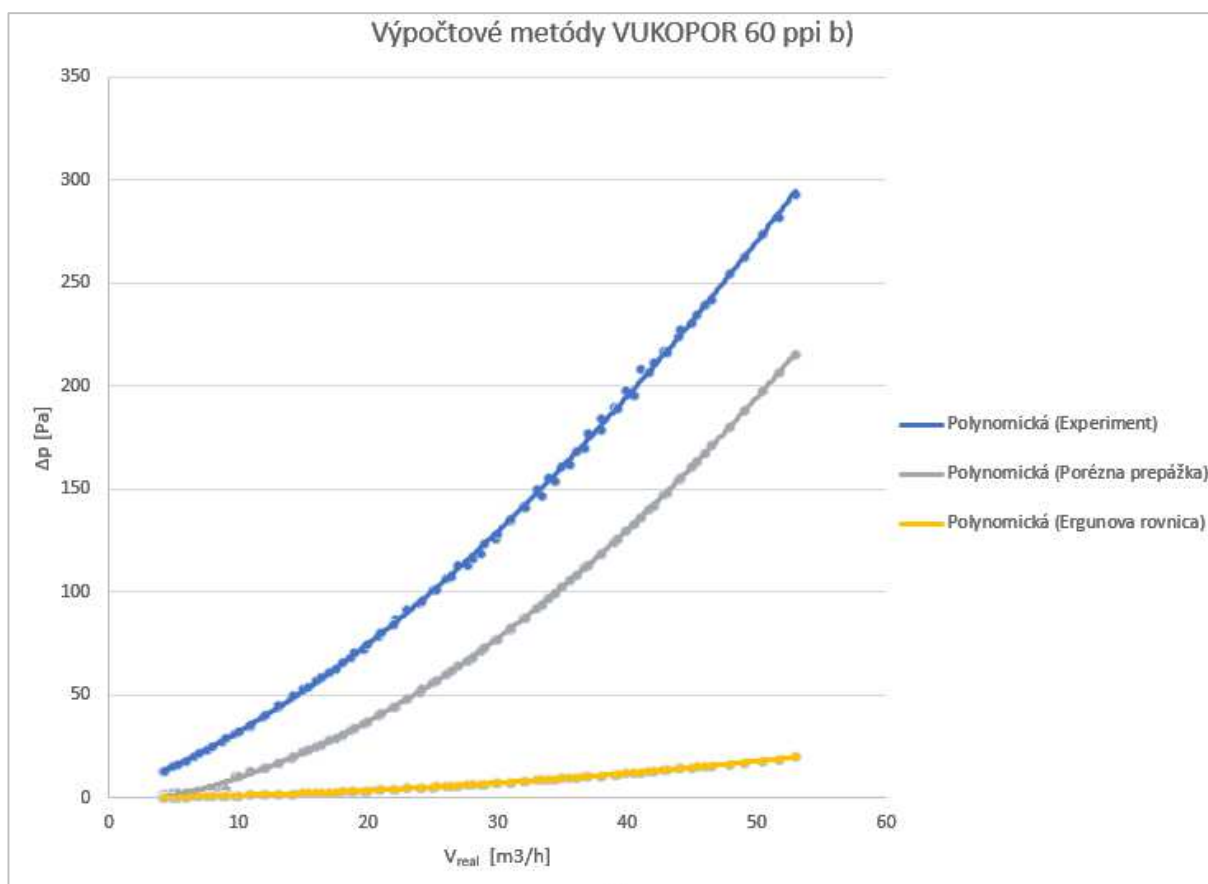


Obrázok 7.11 Porovnanie výpočtových výsledkov s experimentálnymi dátami VUKOPOR 40 ppi

Z grafov na obr. 7.10 a 7.11 je možné vidieť odchýlku až 55 - 72 % v metóde poréznej prepážky a vhodnosť Ergunovej rovnice pre vzorky 20 a 40 ppi.



Obrázok 7.12 Porovnanie výpočtových výsledkov s experimentálnymi dátami VUKOPOR 60 ppi a)



Obrázok 7.13 Porovnanie výpočtových výsledkov s experimentálnymi dátami VUKOPOR 60 ppi b)

Pre vzorku VUKOPOR 60 ppi (obr. 7.12 a 7.13) a teda najhustejšiu sieť buniek Ergunova rovnica nie je vôbec vhodná, dosahuje odchýlky až 93 %. Uspokojivé výsledky dosahuje metóda poréznej prepážky s odchýlkami 26 – 29 %.

Z Výsledkov je možné vyvodiť záver, že pre menej poréznu penu 20 a 40 ppi je vhodná len metóda Ergunovej rovnice s odchýlkou 10 – 26 % a pre viac poréznu penu 60 ppi je vhodná len metóda poréznej prepážky. Dané výsledky sú ovplyvnené dosadzovaním jedného rozmeru buniek, pričom vzorka môže obsahovať rozličné veľkosti buniek ako aj rozličnú pórovitosť stien buniek a rozličnú medzerovitosť naprieč objemom filtra. Jedná sa tak len o približný výpočet tlakových strát peny VUKOPOR a smerodajné výsledky sú z experimentálneho merania.

ZÁVER

Prvá časť diplomovej práce bola zameraná na zoznámenie sa s odvetvím priemyslu využívajúce katalyzátory predovšetkým na čistenie odpadných plynov a spalín. Boli spracované možnosti nakladania s odpadom ako aj perspektívne energetické využitie odpadov a tak bola priblížená prevádzka spaľovne odpadov typu Waste to Energy. Boli stručne charakterizované škodlivé látky vznikajúce pri spaľovaní odpadov ako aj platná legislatíva týkajúca sa ochrany ovzdušia a životného prostredia. Ďalej bola priblížená problematika veľmi nebezpečných prchavých organických látok VOC, ich vplyv na životné prostredie a technológie ich zneškodňovania, ktoré využívajú katalytické reakcie. Následne bola spracovaná kapitola týkajúca sa katalyzátorov a typy nosičov. Spracované boli typy, spôsob výroby a zloženie monolitických katalyzátorov, sypaných loží a keramickej peny VUKOPOR. Keramické penové filtre VUKOPOR ako zaujímavé a potenciálne nosiče katalyzátora využívané v zlievarenstve boli detailne spracované od charakteristiky, výroby, typov až po meranie pórovitosti.

Druhá časť práce opisuje technológie využívajúce katalytické deje a základné rovnice katalýzy. Spracované sú selektívna katalytická redukcia SCR, katalytická filtrácia a katalytická oxidácia prchavých organických látok VOC.

Tretia časť sa zaoberá rešeršou výpočtových metód tlakových strát pre spomenuté nosiče katalyzátorov. Keďže sa jedná o dôležitý parameter katalyzátorov boli spracované viaceré metódy výpočtov tlakových strát u jednotlivých nosičov s cieľom následnej validácie výsledkov s experimentálnymi dátami a vyhodnotením vhodnosti použitia metód. Výpočet tlakovej straty sypaných loží obsahuje detailný popis metódy podľa Levyho, Colbun-Chiltona a Ergunovu rovnicu. U monolitických nosičov je popísaná len metóda podľa Hagen-Poiseuille, využívaná u výpočtoch tlakových strát v potrubiach. Metóda je vhodná aj pre monolity z dôvodu ich štruktúry zloženej v podstate z potrubia. Metóda využíva Hagenovu opravu pre krátke potrubie a miestne odpory. Keďže keramická pena sa ako katalyzátor zatiaľ nevyužíva, výpočtové metódy tlakových strát zatiaľ neexistujú. Pena pripomína svojou štruktúrou poréznu prepážku a tak bola spracovaná táto známa metóda. Pena taktiež pripomína štruktúru sypaných loží a tak sa ponúka využitie upravenej Ergunovej rovnice. Kapitola je zakončená podkapitolou venujúcou sa ventilátorom, ich typom ako aj základnému návrhovému výpočtu na základe tlakových strát.

Posledná štvrtá časť diplomovej práce sa venuje experimentálnemu zariadeniu INTEQ II, jeho technológii a konštrukcii. Bol opísaný princíp praktickej časti v laboratórii ako nastavenie zariadenia a podmienky merania jednotlivých nosičov. Podkapitoly obsahujú detailnú technickú charakteristiku nosičov a grafické vyhodnotenie závislosti reálneho prietoku plynu na tlakovej strate nosičov. Boli navzájom zhodnotené tlakové straty pre referenčnú veľkosť nosičov 1 m a porovnanie novej keramickej peny voči zaužívaným nosičom katalyzátorov. Najväčšie tlakové straty dosahuje VUKOPOR 60 ppi a) a b), čo je spôsobené najhustejšou štruktúrou buniek. Vzorka peny b) je vytvorená zlepením dvoch kusov vzorky a), čo na základe experimentu nemá zásadný vplyv na tlakovú stratu. Vzorky peny s hustotou buniek 60 ppi sa tak javia ako najnevhodnejšie pre použitie nosičov katalyzátorov z dôvodu vysokej hodnoty tlakových strát, ale aj náchylnosťou k zanášaniu nečistotami z dôvodu hustej siete buniek. Ako návrh k ďalšej práci by bolo vhodné vykonať ďalšie experimenty založené na overení zanášania vzoriek 60 ppi. Podobne vysoké straty dosahujú aj najmenšie guľičky 1. Z ostatných nosičov dosahujú najväčšie tlakové straty guľičky 2 a zvyšné VUKOPOR filtre 40 a 20 ppi. Nasledujú sedielka a najmenšie tlakové straty dosahujú HoneyComb 2, 1 a 3.

Vzorky peny 40 a 20 ppi sa tak javia ako vhodné k použitiu ako nosiče katalyzátora, no tiež je dôležitá miera zanášania ako u vzorky 60 ppi. Penové filtre sú aj napriek vysokým hodnotám tlakových strát v porovnaní s klasickými nosičmi katalyzátorov zaujímavá alternatíva z dôvodu vysokej hodnoty medzerovitosti a mernému povrchu, ktorý je dôležitý hlavne u katalytických reakciách.

Nakoniec sú porovnané výsledky uvedených metód s experimentálnymi dátami. Pre vzorky guľčiek sú najvhodnejšie metódy Colburn-Chilton a Ergunova rovnica s odchýlkami 22 a 15 %. Levyho metóda je nevhodná z dôvodu vysokých rozdielov od experimentálnych dát (44 %) z dôvodu pôvodného určenia metódy pre valcové častice. Sedielka neposkytujú uspokojivé výsledky ani u jednej metódy s odchýlkami 44 – 77 %. Metódy sú citlivé na medzerovitosť a sedielka majú svoj špecifický tvar pričom sa medzerovitosť môže počas merania meniť z dôvodu vzájomného uloženia sedielok, čo môže spôsobovať nepresnosti. Metóda Hagen-Poiseuille sa vďaka jednoduchosti štruktúry u nosičov HoneyComb osvedčila s minimálnymi odchýlkami 14 - 35 % od experimentu. Pre keramickú penu VUKOPOR 60 ppi je najvhodnejšia metóda poréznej prepážky s odchýlkami 26 – 29 %. Táto metóda nie je vhodná pre menej porézne vzorky VUKOPOR 20 a 40 ppi a ich menej hustú štruktúru buniek. Pre tieto vzorky je vhodná len Ergunova rovnica s odchýlkami 10 – 26 %. Dané výsledky sú ovplyvnené dosadzovaním jedného rozmeru buniek, pričom vzorka môže obsahovať rozličné veľkosti buniek ako aj rozličnú pórovitosť stien buniek a rozličnú medzerovitosť naprieč objemom filtra. Jedná sa tak len o približný výpočet tlakových strát peny VUKOPOR a smerodajné výsledky sú z experimentálneho merania. Z hľadiska tlakových strát sú vzorky 20 a 400 ppi najvhodnejšie pre použitie ako nosič katalyzátora.

Pokračovaním tejto práce by bolo vhodné experimentálne stanoviť zanášanie keramickej peny VUKOPOR s naneseným katalyzátorom v prevádzke so znečistenými spalinami. Keďže sa jedná o náročný proces výroby filtrov bola by vhodná aj ekonomická bilancia náročnosti prevádzky z hľadiska možnej častej výmeny filtrov.

ZOZNAM POUŽITEJ LITERATÚRY PODĽA ČSN ISO 690

- [1] *Climate Change and the Life Cycle of Stuff*. In: EPA [online]. 6.10.2016 [cit. 2018-01-22]. Dostupné z: 19january2017snapshot.epa.gov/climatechange/climate-change-and-life-cycle-stuff_.html
- [2] Waste to Energy. In: MetroVancouver [online]. 6.10.2016 [cit. 2018-01-22]. Dostupné z: metrovancover.org/services/solid-waste/about/wte/pages/02.aspx
- [3] Metro Vancouver's Waste-to-Energy Facility [online]. 2016, , 4 [cit. 2018-01-22]. Dostupné z: <http://www.metrovancouver.org/services/solid-waste/SolidWastePublications/WTEFactSheet.pdf>
- [4] Vyhláška č. 415/2012 Sb. In: . 2012. [cit. 2018-01-22]. Dostupné také z: www.zakonyprolidi.cz/cs/2012-415#cast2
- [5] Zákon č. 201/2012 Sb. In: . 2012. Dostupné také z: www.zakonyprolidi.cz/cs/2012-201?text=voc
- [6] KRAYZEL, Zbyněk. Zdroje VOC [online]. [cit. 2018-01-22]. Dostupné z: www.ekomonitor.cz/sites/default/files/obrazky/seminare/ovzdusi/seminar4/4_krayzel.pdf
- [7] ELVAC: Ekotechnika-Rekuperativní katalytická oxidace [online]. [cit. 2018-02-22]. Dostupné z: <https://www.elvac.eu/portfolio/ekotechnika/technologie-pro-ochranu-ovzdusi-a-snizovani-emisi-voc/rekuperativni-katalyticka-oxidace>
- [8] ELVAC: Technologie pro ochranu ovzduší a snižování emisí VOC [online]. [cit. 2018-02-22]. Dostupné z: <https://www.elvac.eu/portfolio/ekotechnika/technologie-pro-ochranu-ovzdusi-a-snizovani-emisi-voc/rekuperativni-katalyticka-oxidace>
- [9] LÁNÍK, Boris a Ladislav TOMEK. Filtry, filtrace a filtrování - příručka [online]. Boskovice [cit. 2018-02-22]. Dostupné z: www.lanik.eu
- [10] BÉBAR, Ladislav. Analýza struktury keramických filtrů. Ústav Procesního inženýrství. FSI, VUT v Brně. 2017. [cit. 2018-03-22].
- [11] ČSN EN 623-2: Speciální technická keramika monolitická keramika. Všeobecné a strukturální vlastnosti. Část 2: Stanovení hustoty a pórovitosti. ČESKÁ NORMA, 1995.
- [12] *Emise nebo imise?. BLOG O OVZDUŠÍ V BRNĚ A JIHOMORAVSKÉM KRAJI* [online]. Robert Skeřil, 20.7.2017 [cit. 2018-01-22]. Dostupné z: ovzdusi-brno-jm.cz/index.php/2017/07/20/emise-nebo-imise/
- [13] *TÉMA OVZDUŠIE - Zdroje a charakteristika emisií*. In: MERATEX [online]. 24.10.2011 [cit. 2018-01-22]. Dostupné z: <http://blog.meratex.sk/meratex/tema-ovzdusie-povod-a-charakteristika-znecistujucich-latok-emisii/>
- [14] *Spalovna Malešice* [online]. In: . [cit. 2018-05-22]. Dostupné z: <http://old.vscht.cz/uchop/udalosti/skripta/1ZOZP/odpady/malesice.htm>
- [15] IBLER, Zdeněk. Technický průvodce energetika. 1. díl. Praha: BEN - technická literatura, 2002. ISBN 80-7300-026-1.

- [16] Chemicool Dictionary: Definition of Catalyst [online]. 2017 [cit. 2018-02-22]. Dostupné z: <https://www.chemicool.com/definition/catalyst.html>
- [17] HEMERKA, Jiří a Pavel VYBÍRAL. Základy ochrany ovzduší. Praha: Česká technika - nakladatelství ČVUT, 2008. ISBN 978-80-01-03922-9.
- [18] Johnson Matthey: SCR catalyst - SINOx® Honeycomb [online]. 2017 [cit. 2018-02-22]. Dostupné z: <https://www.jmsec.com/air-pollution-solutions/selective-catalytic-reduction-denox-system/scr-catalyst-sinoxr-honeycomb/>
- [19] MEDEK, Jaroslav. Hydraulické pochody. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2004. Učební texty vysokých škol. ISBN 80-214-2640-3
- [20] BĚBAR, Ladislav. Technologické linky zpracovatelského průmyslu: Reaktory se sypaným ložem. Vysoké učení technické v Brně. Brno, 2017.
- [21] PERRY, Robert a Don GREEN. Perry's Chemical Engineers' Handbook. 8. New York: McGraw-Hill, 2008.
- [22] BĚLOHRADSKÝ, Petr. Průmyslová potrubí a potrubní soustavy. Vysoké učení technické v Brně. Brno, 2017.
- [23] BĚLOHRADSKÝ, Petr. Hydraulika porézní přepážky. Vysoké učení technické v Brně. Brno, 2017.
- [24] BOČEK, Vítězslav. Vlastnosti pěnokeramických filtrů potřebné pro využití v numerických simulacích. Brno, 2017. 56s, 6 příloh, CD. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, fakulta strojního inženýrství. Ústav strojírenské technologie, Odbor slévárenství. vedoucí práce doc. Ing. Antonín Záděra, Ph.D..
- [25] JEDLIČKA, F. Zneškodňování spalín znečištěných NOx II. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2009. 56 s. Vedoucí diplomové práce Ing. Radek Dvořák, Ph.D. [cit. 2018-05-10].
- [26] Radek Dvořák, Petr Chlápek, David Jecha, Radim Puchýř, Petr Stehlík. New approach to common removal of dioxins and NOx as a contribution to environmental protection. 2010. 18 s. Vyd. 9. ISSN 0959-6526. [cit. 2018-05-10]. Dostupné z: www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0959652610000351
- [27] GORE: Dioxin and Furan Catalytic Filter Bags [online]. In: . 2018 [cit. 2018-05-10]. Dostupné z: www.gore.com/products/dioxin-furan-filters-for-crematoriums-incinerations-metals-processing
- [28] KREJČÍ Tomáš . Technologické linky zpracovatelského průmyslu, Vysoké učení technické v Brně. Brno, 2017.
- [29] GRODIG, O. Software pro řízení filtračního zařízení Inteq II. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2014. 59 s. Vedoucí bakalářské práce Ing. Tomáš Macho, Ph.D..
- [30] ROBINSON, John. UNDERSTANDING CATALYSTS A Handbook for the User: Catalytic Combustion [online]. [cit. 2018-05-22]. Dostupné z: [https://www.catalyticcombustion.com/documents/Catalyst%20101%20Bulletin%20Series%20\(1-19\).pdf](https://www.catalyticcombustion.com/documents/Catalyst%20101%20Bulletin%20Series%20(1-19).pdf)
- [31] Ceramic Packings and Balls Process Data [online]. In: . Sun Valley, California, USA.: Raschig, 2018 [cit. 2018-05-22]. Dostupné z: <http://www.raschig.de/Rings-Downloads>

- [32] CARTY, William. Monolithic ceramics and heterogeneous catalysts: honeycombs and foams. In: : ISSN 1359-0286 [online]. New York: New York State College of Ceramics, 1998 [cit. 2018-05-22]. Dostupné z: <http://stobbe.com/media/10426/96800155.pdf>
- [33] InduCeramic. In: : Ceramic honeycomb [online]. 2018 [cit. 2018-05-22]. Dostupné z: <http://www.induceramic.com/ceramic-honeycomb>
- [34] Rafael Kenji Nishihora, Priscila Lemes Rachadel, Mara Gabriela Novy Quadri, Dachamir Hotza. Manufacturing porous ceramic materials by tape casting—A review. 2018. Pages 988-1001. ISSN 0955-2219, [cit. 2018-05-22]. Dostupné z: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0955221917307975>

ZOZNAM POUŽITÝCH SKRATIEK A SYMBOLOV

Symbol Jednotka Veličina

μ	[Pa.s]	dynamická viskozita plynu
ρ	[kg.m ⁻³]	hustota tekutiny
ε	[-]	medzerovitost' sypaného lože
Δp	[Pa]	tlaková strata
$\Delta p/L$	[Pa/m]	tlakový spád v sypanom loži
\bar{c}	[m.s ⁻¹]	stredná prietoková rýchlosť tekutiny v potrubí
a	[m ⁻¹]	špecifický povrch
Al_2O_3	[-]	Oxid hlinitý
Al_2O_5	[-]	Oxid hlinitý
a_r	[m ⁻¹]	relatívny špecifický povrch.
c	[m/s]	rýchlosť tekutiny poréznou prepážkou
CO	[-]	Oxid uhoľnatý
CO_2	[-]	Oxid uhličitý
D_{ax}	[m]	priemer sypaného lože
d_h	[m]	hydraulický priemer potrubia
d_k	[m]	priemer výtlačku
d_p	[m]	priemer pórov
D_p	[m]	charakteristický rozmer častice sypaného lože
f_m	[-]	parameter získaný z grafu v závislosti na modifikovanom Re
G	[kg.m ⁻² .s ⁻¹]	hustota hmotnostného toku plynu ložem
h	[m]	výška vrstvy
HCl	[-]	Kyselina chlorovodíková
HF	[-]	Kyselina fluorová
l	[m]	Dĺžka potrubia
L	[m]	výška sypaného lože
l_k	[m]	dĺžka výtlačku
MoO_3	[-]	Oxidu molybdenový
n	[-]	exponent získaný z grafu v závislosti na modifikovanom Re
NO	[-]	Oxid dusnatý
NO_2	[-]	Oxid dusničitý

NO _x	[-]	Oxidy dusíku
p ₀	[kPa]	tlak okolia
p ₁	[kPa]	tlak spalín
PCDD	[-]	Polychlórované dibenzo-p-dioxíny
PCDF	[-]	Polychlórované dibenzo-fúrany
ppi	[-]	Počet pórov na dĺžkový palec
Q	[m _n ³ /h]	reálny prietok spalín
SCR	[-]	Selektívna katalytická redukcia
SiC	[-]	Karbid kremíku
SiO ₂	[-]	Oxid kremičitý
SO ₂	[-]	Oxid siričitý
SO ₃	[-]	Oxid sírový
T ₀	[°C]	teplota okolia
T ₁	[°C]	teplota spalín
TiO ₂	[-]	Oxid titaničitý
TOC	[-]	Celkový organický uhlík
TOC	[-]	Organické látky
TZL	[-]	Tuhé znečisťujúce látky
V ₀	[Nm ³ /h]	množstvo vlhkých spalín
V ₂ O ₅	[-]	Oxid vanadičný
VOC	[-]	Prchavé organické látky
WO ₃	[-]	Oxid wolframový
ZrO ₂	[-]	Oxid zirkoničitý
α	[-]	súčiniteľ klúkatosti pórov
λ _{pp}	[-]	súčiniteľ odporu
ξ	[-]	súčiniteľ miestneho odporu
ρ _{real}	[kg/m ³]	reálna hustota spalín
ρ _{vz}	[kg/m ³]	hustota vzduchu
Φ _s	[-]	tvarový faktor
ν	[m ² .s ⁻¹]	kinematická viskozita tekutiny

Symbol Jednotka Veličina

Δp_{ref}	[Pa]	referenčná tlaková strata veľkosti nosiča 1 m
\dot{Q}	[m ³ /h]	prietok plynu za normálnych podmienok
l	[m]	veľkosť nosiča
l_{ref}	[m]	referenčná veľkosť náplne nosiča 1 m
V_{kat}	[m ³]	objem katalyzátora
x	[m ³ /h]	reálny prietok vzduchu komorou s nosičom katalyzátora
y	[Pa]	tlaková strata prázdnej filtračnej komory
Δp	[Pa]	tlaková strata nosiča
Δp_{celk}	[kPa]	tlaková diferencia sania a výtlaku ventilátora
Δp_{celk1}	[kPa]	celková tlaková diferencia

ZOZNAM PRÍLOH

Príloha č.1 CD (bakalárska práca vo formáte PDF, výpočtové programy v Exceli)